



**Universidad Autónoma Metropolitana**

Unidad Azcapotzalco

---

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA  
FUERZA EFECTIVA DE PRESFUERZO EN  
ESTRUCTURAS EXISTENTES**

**T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

P R E S E N T A

**GUALBERTO HERNÁNDEZ JUÁREZ**

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. ÓSCAR MANUEL GONZÁLEZ CUEVAS**

**DR. EDUARDO ARELLANO MÉNDEZ**

CIUDAD DE MÉXICO

SEPTIEMBRE DE 2017

*Dedicada a mi familia por todo el apoyo que siempre me  
han brindado.*

***A mis padres***

*Fortino Hernández Salgado  
Juana Juárez Guadarrama*

***A mis hermanos***

*Nelson Hernández Juárez  
Hector Hernández Juárez*

***A mi esposa e hijos***

*Roselia Cortez González  
Johan Hernández Cortez  
Jaziel Hernández Cortez*

*Esta tesis es el resultado de todo nuestro esfuerzo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores de tesis, Dr. Oscar Manuel González Cuevas y Dr. Eduardo Arellano Méndez, por su incondicional apoyo durante todo el desarrollo de esta investigación. Gracias a su tiempo, dedicación y excelente dirección, fue posible llevar a cabo este trabajo.

A mis sinodales, Dr. Ulises Mena Hernández y Dr. Hans Israel Archundia Aranda, por sus valiosos comentarios, recomendaciones y observaciones que sin duda mejoraron este trabajo.

Al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) y a la Gerencia de Ingeniería Civil (GIC) de dicho instituto, por todas las facilidades técnicas y económicas proporcionadas durante la realización de mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A) por facilitar sus instalaciones para realizar el programa experimental, especialmente su Laboratorio de Estructuras.

Al M.I. Gilberto Rangel Torres y a la Sra. Silvia Ledezma, por su apreciable apoyo en el desarrollo del trabajo experimental.

A mis compañeros de trabajo experimental, Nayeli Pérez Rodríguez, Susana Rodríguez Zepahua, Oscar Mendoza Pimentel y Rodrigo Díaz Sánchez, con quienes hice un gran equipo de trabajo. Asimismo, agradezco a todos los alumnos de Servicio Social y Taller de Ingeniería Civil de la UAM-A que participaron en las distintas etapas del trabajo experimental.

A mis compañeros y amigos que de alguna forma me alentaron a realizar mis estudios de maestría, M.I. Juan Carlos Corona Fortunio, M.C. Alonso Alvarado González, M.I.E. Jesús Salvador García Carrera e Ing. Marco Flores Hernández. Asimismo, agradezco sus valiosos comentarios que enriquecieron esta tesis.

A la empresa MEXPRESA por las facilidades proporcionadas durante el desarrollo experimental de la tesis, en particular al Ing. Héctor Huicochea Alanís.

A la empresa PRETENCRETO por el apoyo brindado en la modelación numérica, en especial al Ing. Armando Onofre.

## RESUMEN

En esta tesis se presenta la metodología desarrollada para estimar la fuerza efectiva de presfuerzo en estructuras existentes utilizando como parámetro de evaluación la deformación unitaria en el acero de presfuerzo, así como todos los trabajos que la fundamentan, como es la revisión del estado del arte. Para ello, se diseñaron y construyeron tres modelos de ensaye de concreto postensado en los que se tensaron diversas muestras de torón a distintos niveles de carga para posteriormente ser destensados de forma súbita o controlada. En este proceso se midió la deformación unitaria con deformímetros electrónicos (*strain gages*) y transductores de desplazamiento, y se relacionó con los esfuerzos de tensión correspondientes a través de curvas esfuerzo-deformación obtenidas de pruebas de tensión realizadas en la máquina universal.

La mayor diferencia que se presentó entre los esfuerzos de tensión conocidos a través del sistema de postensado y los estimados no excedió el 13%, lo cual, desde un enfoque práctico se considera aceptable. Además, a partir de las curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo obtenidas experimentalmente, se propuso un modelo constitutivo que es útil para el diseño de elementos de concreto presforzado.

Este trabajo pretende poner las bases para el desarrollo de una metodología que permita estimar la pérdida de presfuerzo en estructuras reales.

### Organización de la tesis

El trabajo está integrado por siete capítulos y siete apéndices. Los capítulos están organizados de la siguiente forma:

1. *Introducción.* Se da una descripción sobre la problemática que motivó a llevar a cabo esta investigación. Asimismo, se define el objetivo general y los objetivos específicos a realizar.
2. *Antecedentes.* Se mencionan las técnicas destructivas y no destructivas que, de acuerdo a la literatura, han sido utilizadas con el propósito de estimar la fuerza efectiva de presfuerzo en estructuras existentes.
3. *Descripción, diseño y construcción de los modelos de ensaye.* Se describe la geometría y armados de los respectivos modelos de ensaye, así como los modelos numéricos que se realizaron para su diseño. Al final, se describe su proceso constructivo.

4. *Pruebas de tensión de torones de presfuerzo.* Se describen los trabajos que se realizaron durante las pruebas de tensión de torones de presfuerzo y se presentan los resultados obtenidos por medio de curvas esfuerzo-deformación.
5. *Modelo constitutivo propuesto.* Se describen los criterios que se siguieron para definir un modelo constitutivo para el acero de presfuerzo utilizado. Para su definición, se tomaron como base las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente.
6. *Estimación del esfuerzo efectivo de torones de presfuerzo en campo.* Se describen los procedimientos que se siguieron durante las pruebas de tensado y destensado, y la medición de deformaciones unitarias. Asimismo, se presentan los resultados obtenidos y los niveles de precisión alcanzados en la estimación de los esfuerzos.
7. *Conclusiones y recomendaciones.* Se detallan las conclusiones obtenidas en esta investigación y se proporcionan recomendaciones para llevar a cabo trabajos futuros, con el propósito de enriquecer los resultados conseguidos.

En lo que respecta a los apéndices:

- Apéndice A. Se describen las pruebas de tensión preliminares que se realizaron utilizando distintas técnicas de sujeción en los extremos de los especímenes.
- Apéndice B. Se describen las pruebas de tensión preliminares que se realizaron para definir el tipo de instrumentación a utilizar.
- Apéndice C. Se presentan las curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo obtenidas de las pruebas de tensión que describen en el capítulo 4.
- Apéndice D. Se presentan las propiedades mecánicas del acero de presfuerzo obtenidas de las pruebas de tensión que describen en el capítulo 4.
- Apéndice E. Se presentan las propiedades mecánicas del concreto y el acero de refuerzo que resultaron de distintas pruebas aplicadas a dichos materiales.
- Apéndice F. Se muestra el cálculo de pérdidas de presfuerzo consideradas en el diseño de los modelos de ensaye.
- Apéndice G. Se muestran las deformaciones unitarias que se midieron en el acero de refuerzo durante las pruebas de tensado y destensado de muestras de torón.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN.....</b>	<b>i</b>
Organización de la tesis.....	i
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	3
1.2 REFERENCIAS.....	4
<b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO.....	5
2.2 ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS EMPLEADAS PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS Y LA FUERZA EFECTIVA DE PRESFUERZO EN ESTRUCTURAS EXISTENTES .....	6
2.2.1 Método fuerza-desplazamiento .....	6
2.2.2 Investigación NCHRP (1999) .....	9
2.2.3 Emisiones acústicas (EA).....	9
2.2.4 Parámetros dinámicos de la estructura .....	10
2.2.5 Cuerdas vibrantes .....	12
2.3 COMENTARIOS.....	12
2.4 REFERENCIAS.....	13
<b>CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYE         .....</b>	<b>15</b>
3.1 IDENTIFICACIÓN .....	15
3.2 MATERIALES EMPLEADOS .....	16
3.3 ARMADOS .....	17
3.4 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO .....	19
3.5 MODELOS NUMÉRICOS.....	19
3.6 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS .....	21
3.6.1 TIPOS DE ELEMENTOS.....	23
3.6.2 CRITERIOS DE MODELADO .....	27
3.6.3 CONDICIONES DE APOYO Y DE FRONTERA .....	27
3.6.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	28

3.7	CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYE .....	34
3.7.1	Acero de refuerzo y cimbra .....	34
3.7.2	Acero de presfuerzo .....	35
3.7.3	Instrumentación.....	38
3.7.4	Colado .....	40
3.8	COMENTARIOS.....	42
3.9	REFERENCIAS.....	42
<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS DE TENSIÓN DE TORONES DE PRESFUERZO .....</b>		<b>44</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	44
4.2	PRUEBAS DE TENSIÓN .....	45
4.2.1	NORMATIVIDAD .....	45
4.2.2	MONTAJE .....	45
4.2.3	INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	47
4.2.4	PROCEDIMIENTO .....	51
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	52
4.3.1	INTRODUCCIÓN .....	52
4.3.2	RESISTENCIA DE RUPTURA .....	58
4.3.3	CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA.....	63
4.3.4	RESISTENCIA DE FLUENCIA .....	68
4.3.5	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	69
4.3.6	ELONGACIÓN.....	71
4.3.7	CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA PROMEDIO EXPERIMENTALES. .....	72
4.4	COMENTARIOS.....	75
4.5	REFERENCIAS.....	76
<b>CAPÍTULO 5: MODELO CONSTITUTIVO PROPUESTO.....</b>		<b>77</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	77
5.2	ANTECEDENTES .....	78
5.3	APLICACIÓN DE LA FÓRMULA DE LA POTENCIA.....	80
5.4	FUNCIÓN RACIONAL .....	83
5.5	MODELO CONSTITUTIVO PROPUESTO A PARTIR DEL LVDT .....	84
5.6	ECUACIONES PARA REPRODUCIR LAS CURVAS EXPERIMENTALES .....	86
5.7	COMENTARIOS.....	90
5.8	REFERENCIAS.....	91

<b>CAPÍTULO 6: ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO EFECTIVO DE TORONES DE PRESFUERZO EN CAMPO .....</b>	<b>92</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	92
6.2 ANTECEDENTES .....	93
6.2.1 Teorías de esfuerzos y deformaciones en torones de siete alambres.....	93
6.3 ELABORACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PRUEBA.....	100
6.3.1 Dispositivo de seguridad.....	100
6.3.2 Dispositivo antideflexiones.....	101
6.3.3 Dispositivo de medición.....	103
6.4 POSTENSADO DE ESPECÍMENES .....	105
6.5 PRUEBAS PARA ESTIMAR EL ESFUERZO EFECTIVO DE PRESFUERZO EN CAMPO	108
6.5.1 ETAPA 1 (DESTENSADO CONTROLADO, DC) .....	108
6.5.2 ETAPA 2 (DESTENSADO SÚBITO, DS).....	113
6.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	118
6.6.1 ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN EL DESTENSADO CONTROLADO (DC) .....	118
6.6.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL DESTENSADO CONTROLADO (DC).....	122
6.6.3 ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN EL DESTENSADO SÚBITO (DS) .....	129
6.6.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL DESTENSADO SÚBITO (DS) ...	131
6.7 DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO .....	143
6.8 COMENTARIOS.....	146
6.9 REFERENCIAS.....	147
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>148</b>
7.1 CONCLUSIONES .....	148
7.2 RECOMENDACIONES.....	150
7.3 REFERENCIAS.....	151
<b>APÉNDICE A: MÉTODOS DE SUJECCIÓN PROBADOS .....</b>	<b>152</b>
A.1 Prueba utilizando cuñas de 0.5” y placas de acunamiento .....	152
A.2 Prueba utilizando mordazas de uso múltiple .....	153
A.3 Prueba utilizando lámina de aluminio cal. 24.....	155
A.4 Prueba utilizando tubo de aluminio abierto longitudinalmente y adherido al torón mediante adhesivo epóxico mezclado con óxido de aluminio .....	155
A.5 Prueba utilizando tubo de aluminio cerrado adherido al torón mediante distintos tipos de adhesivos epóxicos .....	157



A.6	Tubo de aluminio cerrado adherido al torón utilizando adhesivo epóxico HRE-500 HILTI ..	160
A.7	REFERENCIAS .....	161
<b>APÉNDICE B: DEFINICIÓN DE MODELOS DE <i>STRAIN GAGES</i> PARA PRUEBAS DE TENSIÓN.....</b>		<b>162</b>
<b>APÉNDICE C: CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA DEL ACERO DE PRESFUERZO .....</b>		<b>167</b>
<b>APÉNDICE D: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO DE PRESFUERZO .....</b>		<b>176</b>
D.1	RESISTENCIAS DE RUPTURA .....	176
D.2	RESISTENCIAS ÚLTIMAS.....	177
D.3	RESISTENCIAS DE FLUENCIA .....	178
D.4	MÓDULOS DE ELASTICIDAD.....	180
D.5	ELONGACIONES .....	181
<b>APÉNDICE E: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO Y EL ACERO DE REFUERZO .....</b>		<b>182</b>
E.1	CONCRETO .....	182
E.1.1	Resistencia a la compresión .....	182
E.1.2	Módulo de elasticidad .....	183
E.1.3	Resistencia a la flexión.....	184
E.1.4	Resistencia a la tensión .....	185
E.2	ACERO DE REFUERZO .....	186
E.3	REFERENCIAS.....	189
<b>APÉNDICE F: CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO.....</b>		<b>191</b>
F.1	DATOS .....	191
F.2	SOLUCIÓN .....	192
F.2.1	PÉRDIDAS INMEDIATAS .....	192
F.2.2	PÉRDIDAS DIFERIDAS .....	193
F.3	REFERENCIAS.....	195
<b>APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO .....</b>		<b>196</b>
G.1	MODELO DE ENSAYE TP-150.....	196
G.1.1	Torón 1 DC-TP-150-E1 .....	196
G.1.2	Torón 2 DC-TP-150-E1 .....	199
G.1.3	Torón 1 DS-TP-150-E2A.....	201
G.1.4	Torón 2 DS-TP-150-E2B .....	201

G.2	MODELO DE ENSAYE TP-250 .....	202
G.2.1	Torón 1 DC-TP-250-E1 .....	202
G.2.2	Torón 2 DC-TP-250-E1 .....	204
G.2.3	Torón 1 DS-TP-250-E2B .....	206
G.2.4	Torón 2 DS-TP-250-E2B .....	207
G.3	MODELO DE ENSAYE TP-300 .....	208
G.3.1	Torón 1 DC-TP-300-E1 .....	208
G.3.2	Torón 2 DC-TP-300-E1 .....	210
G.3.3	Torón 1 DS-TP-300-E2A .....	212
G.3.4	Torón 2 DS-TP-300-E2A .....	213

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Métodos evaluados por el NCHRP (1999) .....	9
Tabla 3.1 Materiales.....	17
Tabla 3.2 Resumen de diseño con los dos torones inferiores en la etapa de transferencia .....	20
Tabla 3.3 Resumen de diseño con los tres torones en la etapa de transferencia .....	21
Tabla 3.4 Comparación de deflexiones entre el modelo de Wolanski (2004) y el modelo reproducido ....	22
Tabla 3.5 Tipos de elementos .....	23
Tabla 3.6 Resumen de deflexiones .....	30
Tabla 4.1 Características de <i>strain gages</i> utilizados .....	49
Tabla 4.2 Criterio de Chauvenet para rechazar una lectura .....	57
Tabla 4.3 Resumen estadístico de resistencias de ruptura .....	59
Tabla 4.4 Criterio de Chauvenet para resistencias de ruptura del LVDT .....	62
Tabla 4.5 Criterio de Chauvenet para resistencias de ruptura de los <i>strain gages</i> .....	63
Tabla 4.6 Resumen estadístico de resistencias de fluencia .....	69
Tabla 4.7 Resumen estadístico de módulos de elasticidad .....	71
Tabla 4.8 Resumen estadístico de elongaciones .....	72
Tabla 5.1 Constantes de la fórmula de la potencia para distintos tipos de acero .....	79
Tabla 6.1 Características de transductores de desplazamiento utilizados .....	109
Tabla 6.2 Especímenes de prueba en Etapa 1 .....	110
Tabla 6.3 Especímenes de prueba en Etapas 2A y 2B .....	115
Tabla 6.4 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DC-TP-150-E1).....	118
Tabla 6.5 Elongaciones de validación (Torón 1 DC-TP-150-E1).....	119
Tabla 6.6 Esfuerzos calculados con los transductores (Torón 1 DC-TP-150-E1) .....	119
Tabla 6.7 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2ET (Torón 1 DC-TP-150-E1) .....	120
Tabla 6.8 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2EA (Torón 1 DC-TP-150-E1).....	120
Tabla 6.9 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2EA_PROY (Torón 1 DC-TP-150-E1) .....	122
Tabla 6.10 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-150-E1) .....	122
Tabla 6.11 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-150-E1) .....	123
Tabla 6.12 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-250-E1) .....	124
Tabla 6.13 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-250-E1) .....	125
Tabla 6.14 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-300-E1) .....	126
Tabla 6.15 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-300-E1) .....	127
Tabla 6.16 Resumen de aproximación en promedios en el DC .....	128
Tabla 6.17 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DS-TP-150-E2A) .....	129
Tabla 6.18 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2EA (Torón 1 DS-TP-150-E2A) .....	130
Tabla 6.19 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2EA_PROY (Torón 1 DS-TP-150-E2A).....	130
Tabla 6.20 Esfuerzos estimados con el <i>strain gage</i> 2ET (Torón 1 DS-TP-150-E2A).....	131
Tabla 6.21 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-150-E2A).....	132
Tabla 6.22 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-300-E2A).....	133
Tabla 6.23 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-300-E2A).....	134
Tabla 6.24 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte A .....	135

Tabla 6.25 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte B .....	135
Tabla 6.26 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2-DS-TP-150-E2B PROY) .....	136
Tabla 6.27 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A .....	137
Tabla 6.28 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B .....	138
Tabla 6.29 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B PROY).....	139
Tabla 6.30 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte A .....	140
Tabla 6.31 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte B .....	140
Tabla 6.32 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B PROY).....	141
Tabla 6.33 Resumen de estimación de esfuerzos en Etapa 2A .....	142
Tabla 6.34 Resumen de estimación de esfuerzos en Etapa 2B .....	143
Tabla 6.35 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A.....	144
Tabla 6.36 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B.....	145
Tabla 6.37 Comparación de deformaciones unitarias.....	146
Tabla B.1 Características de <i>strain gages</i> .....	162
Tabla D.1 Resistencias de ruptura.....	176
Tabla D.2 Resistencias últimas .....	177
Tabla D.3 Resistencias de fluencia (parte A).....	178
Tabla D.4 Resistencias de fluencia (parte B).....	179
Tabla D.5 Módulos de elasticidad.....	180
Tabla D.6 Elongaciones .....	181
Tabla E.1 Resultados de resistencia a la compresión del concreto .....	182
Tabla E.2 Módulos de elasticidad.....	183
Tabla E.3 Módulos de ruptura.....	184
Tabla E.4 Resistencias a la tensión .....	185
Tabla E.5 Resultados de la barra del No. 5 .....	186
Tabla E.6 Resultados de la barra del No. 3 .....	188
Tabla F.1 Resumen de pérdidas .....	194
Tabla G.1 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte A .....	196
Tabla G.2 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte B .....	197
Tabla G.3 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte A .....	199
Tabla G.4 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte B .....	199
Tabla G.5 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-150-E2A) Parte A.....	201
Tabla G.6 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-150-E2A) Parte B.....	201
Tabla G.7 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte A.....	201
Tabla G.8 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte B .....	202
Tabla G.9 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte A .....	202
Tabla G.10 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte B .....	202
Tabla G.11 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte A .....	204
Tabla G.12 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte B .....	204
Tabla G.13 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A .....	206
Tabla G.14 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B .....	207
Tabla G.15 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte A .....	207
Tabla G.16 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte B .....	207
Tabla G.17 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte A .....	208

Tabla G.18 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte B .....	208
Tabla G.19 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte A .....	210
Tabla G.20 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte B .....	210
Tabla G.21 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-300-E2A) Parte A.....	212
Tabla G.22 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-300-E2A) Parte B .....	212
Tabla G.23 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-300-E2A) Parte A.....	213
Tabla G.24 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-300-E2A) Parte B .....	213

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Falla en compuerta de la central hidroeléctrica La Villita (tomada de Marengo 2014) .....	2
Figura 1.2 Colapso de puente (tomada de <a href="http://www.nace.org">www.nace.org</a> ) .....	2
Figura 2.1 Pérdida de presfuerzo (adaptada de Raymond y Mickleborough 2005).....	6
Figura 2.2 Método esquemático fuerza lateral-deflexión (Civjan <i>et al.</i> 1995) .....	7
Figura 2.3 Prototipo (Civjan <i>et al.</i> 1995).....	8
Figura 2.4 Dispositivo en operación (Civjan <i>et al.</i> 1995).....	8
Figura 2.5 Estructura real y conjunto experimental (Perrin <i>et al.</i> 2009).....	10
Figura 2.6 Modelo de prueba (Saiidi <i>et al.</i> 1994) .....	11
Figura 2.7 Medición de deformaciones en vigas pretensadas (López y Kahn 2007).....	12
Figura 3.1 Modelo TP-150 (dimensiones en cm) .....	15
Figura 3.2 Modelo TP-250 (dimensiones en cm) .....	16
Figura 3.3 Modelo TP-300 (dimensiones en cm) .....	16
Figura 3.4 Armados de modelos de ensaye (dimensiones en cm) .....	18
Figura 3.5 Secciones transversales (dimensiones en cm) .....	18
Figura 3.6 Modelos en el programa CONCISE .....	20
Figura 3.7 Comparación de deflexiones considerando sólo el efecto del presfuerzo .....	22
Figura 3.8 Modelado de torones desadheridos utilizando un sistema de resortes (adaptada de Huang <i>et al.</i> 2009) .....	23
Figura 3.9 Identificación del acero de presfuerzo .....	24
Figura 3.10 Curva esfuerzo-deformación (Wolanski 2004) .....	25
Figura 3.11 Elementos que integran el modelo de elemento finito.....	27
Figura 3.12 Condiciones de apoyo y de frontera .....	28
Figura 3.13 Zonas susceptibles a agrietarse.....	28
Figura 3.14 Deflexiones .....	29
Figura 3.15 Esfuerzos Von Mises .....	31
Figura 3.16 Esfuerzos en fibra superior modelo TP-250 2T .....	32
Figura 3.17 Esfuerzos en fibra inferior modelo TP-250 2T .....	32
Figura 3.18 Esfuerzos en fibra superior modelo TP-250 3T .....	33
Figura 3.19 Esfuerzos en fibra inferior modelo TP-250 3T .....	33
Figura 3.20 Refuerzo en anclaje .....	34
Figura 3.21 Actividades iniciales en la construcción de los modelos de ensaye .....	35
Figura 3.22 Ubicación del acero de presfuerzo.....	35
Figura 3.23 Geometría de placa de anclaje, cuñas y torón (dimensiones en mm) .....	36
Figura 3.24 Tipos de anclaje .....	37
Figura 3.25 Colocación de anclas, cuñas y acero de presfuerzo .....	37
Figura 3.26 Anclajes colocados .....	38
Figura 3.27 Ubicación de <i>strain gages</i> (Sg) en el acero de refuerzo ordinario.....	38
Figura 3.28 Procedimiento de colocación de <i>strain gages</i> .....	40
Figura 3.29 Actividades previas.....	40
Figura 3.30 Procedimiento de colado y descimbrado .....	41
Figura 4.1 Mordazas utilizadas en pruebas de tensión.....	46

Figura 4.2 Preparación de sujeción con tubos de aluminio.....	47
Figura 4.3 Colocación del LVDT en espécimen de prueba .....	48
Figura 4.4 Colocación del extensómetro modelo TIM durante las pruebas de la primera etapa .....	48
Figura 4.5 Identificación de <i>strain gages</i> utilizados .....	49
Figura 4.6 Distribución de <i>strain gages</i> en especímenes de prueba .....	50
Figura 4.7 Equipos utilizados durante las pruebas.....	51
Figura 4.8 Ilustración de las propiedades de esfuerzo-deformación evaluadas durante este trabajo .....	52
Figura 4.9 Medición del diámetro de los alambres del torón con una cabeza micrométrica .....	54
Figura 4.10 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 11 .....	55
Figura 4.11 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 24 .....	55
Figura 4.12 Curva esfuerzo-deformación (Loflin 2008).....	56
Figura 4.13 Ilustración de los tipos de fallas presentadas en las pruebas de tensión .....	60
Figura 4.14 Detalle de ruptura en alambres .....	61
Figura 4.15 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el transductor (LVDT).....	64
Figura 4.16 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el <i>strain gage</i> (2EA).....	65
Figura 4.17 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el <i>strain gage</i> (2ET) .....	66
Figura 4.18 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el <i>strain gage</i> (1ET) .....	67
Figura 4.19 Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero (adaptada de Rodríguez y Botero 1997) .....	68
Figura 4.20 Método de deformación permanente (adaptada de NMX-B-172 1988) .....	69
Figura 4.21 Criterio para calcular el módulo de elasticidad .....	70
Figura 4.22 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el transductor (LVDT).....	73
Figura 4.23 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el <i>strain gage</i> (2EA).....	73
Figura 4.24 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el <i>strain gage</i> (2ET) .....	74
Figura 4.25 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el <i>strain gage</i> (1ET) .....	74
Figura 4.26 Curvas esfuerzo-deformación promedio.....	75
Figura 5.1 Curva fuerza- deformación para tres torones de distinto diámetro (ANIPPAC 2000).....	77
Figura 5.2 Curva esfuerzo-deformación idealizada para acero de presfuerzo de siete alambres de baja relajación (PCI 2004).....	78
Figura 5.3 Curva esfuerzo-deformación típica del acero de presfuerzo considerada en la fórmula de la potencia (adaptada de Devalapura y Tadros 1992).....	80
Figura 5.4 Comparación de curvas esfuerzo-deformación experimental y analítica .....	82
Figura 5.5 Integración de la ley de Hooke y la fórmula de la potencia en el modelo constitutivo propuesto .....	82
Figura 5.6 Curvas de la función racional $y=4/(x-2)$ .....	83
Figura 5.7 Integración de la ley de Hooke, la fórmula de la potencia y la función racional en el modelo constitutivo propuesto.....	84
Figura 5.8 Comparación de la curva promedio experimental y la curva propuesta.....	85
Figura 5.9 Comparación de la curva PCI (2004) y la curva propuesta .....	85
Figura 5.10 Instrumentación de torones con <i>strain gages</i> en investigaciones anteriores .....	86
Figura 5.11 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del LVDT .....	87
Figura 5.12 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del <i>strain gage</i> 2EA .....	89

Figura 5.13 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del <i>strain gage</i> 2ET.....	90
Figura 5.14 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del <i>strain gage</i> 1ET.....	90
Figura 6.1 Diámetros y formas más comunes de torones de presfuerzo (adaptada de Sumitomo Electric Corp, Japón 2017).....	93
Figura 6.2 Tipos de cables más comunes (adaptada de Costello 1997).....	93
Figura 6.3 Características geométricas del torón estudiado por Machida y Durelli (1973).....	94
Figura 6.4 Consideraciones geométricas del torón de siete alambres (Costello 1997).....	97
Figura 6.5 Fuerzas actuando en un alambre helicoidal (Costello 1997).....	97
Figura 6.6 Elementos del dispositivo de seguridad.....	101
Figura 6.7 Dispositivo de seguridad construido.....	101
Figura 6.8 Elementos del dispositivo antideflexiones.....	102
Figura 6.9 Dispositivo antideflexiones construido.....	102
Figura 6.10 Elementos del dispositivo de medición con transductores de desplazamiento.....	104
Figura 6.11 Montaje externo del dispositivo de medición y elementos de sujeción.....	104
Figura 6.12 Transductores de desplazamiento colocados sobre una muestra de torón.....	105
Figura 6.13 Equipo utilizado en el postensado.....	105
Figura 6.14 Accesorios para acuanamiento.....	106
Figura 6.15 Postensado de torones inferiores del modelo TP-300.....	106
Figura 6.16 Elongación final de torones inferiores en modelos de ensaye.....	107
Figura 6.17 Nomenclatura utilizada para identificación de torones de prueba.....	108
Figura 6.18 <i>Strain gages</i> utilizados para medir las deformaciones unitarias en la primera etapa de pruebas.....	109
Figura 6.19 Transductores utilizados para medir las elongaciones.....	109
Figura 6.20 Instrumentación en extremos de modelos.....	110
Figura 6.21 Equipo de adquisición de datos y bomba hidráulica.....	111
Figura 6.22 Montaje de dispositivos.....	111
Figura 6.23 Ejecución de la prueba.....	112
Figura 6.24 Ciclo $0.80f_{pu}$ del espécimen Torón 1 DC-TP-150-E1 (Parte A, Tensado).....	112
Figura 6.25 Ciclo $0.80f_{pu}$ del espécimen Torón 1 DC-TP-150-E1 (Parte B, Destensado).....	113
Figura 6.26 Distribución de <i>strain gages</i> en las Etapas 2A y 2B.....	113
Figura 6.27 Deslizamiento del TD_300 en un punto de sujeción con el torón.....	114
Figura 6.28 Preparación y tipo de falla presentada con soldadura CADWELD.....	114
Figura 6.29 Sistemas de postensado activo en Etapas 2A y 2B.....	116
Figura 6.30 Esfuerzo objetivo $\approx 0.80f_{pu}$ del espécimen Torón 1 DS-TP-250-E2B (Tensado).....	116
Figura 6.31 Corte en torón de prueba en Etapa 2A.....	117
Figura 6.32 Corte en torón de prueba en Etapa 2B.....	117
Figura 6.33 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-150-E1).....	123
Figura 6.34 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-150-E1).....	124
Figura 6.35 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-250-E1).....	125
Figura 6.36 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-250-E1).....	126
Figura 6.37 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-300-E1).....	127
Figura 6.38 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-300-E1).....	128



Figura 6.39 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-150-E2A) .....	132
Figura 6.40 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-300-E2A) .....	133
Figura 6.41 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-300-E2A) .....	134
Figura 6.42 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) .....	136
Figura 6.43 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) PROY .....	137
Figura 6.44 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B) .....	138
Figura 6.45 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B PROY).....	139
Figura 6.46 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B) .....	141
Figura 6.47 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B PROY).....	142
Figura 6.48 Ubicación de <i>strain gages</i> en el acero de refuerzo .....	144
Figura A.1 Método de sujeción utilizando cuñas y placas de acunamiento.....	152
Figura A.2 Curva carga-desplazamiento utilizando cuñas y placas de acunamiento.....	153
Figura A.3 Barril, cuñas y resorte de mordazas .....	153
Figura A.4 Ejecución de prueba utilizando mordazas de uso múltiple.....	154
Figura A.5 Curva carga-desplazamiento utilizando mordazas de uso múltiple.....	154
Figura A.6 Método de sujeción empleando lámina de aluminio cal. 24.....	155
Figura A.7 Óxido de aluminio y adhesivo epóxico DEVCON .....	155
Figura A.8 Método de sujeción utilizando tubo de aluminio y adhesivo epóxico .....	156
Figura A.9 Curva carga-desplazamiento utilizando tubo de aluminio abierto.....	156
Figura A.10 Método de sujeción utilizando tubo de aluminio cerrado con distintos tipos de adhesivos .	157
Figura A.11 Resultados de las pruebas utilizando distintos adhesivos .....	159
Figura A.12 Preparación de extremos de sujeción en torones de prueba.....	160
Figura B.1 Distribución de <i>strain gages</i> .....	162
Figura B.2 Procedimiento para la colocación del adhesivo KLIP-TON.....	163
Figura B.3 Curva carga-desplazamiento obtenida con el adhesivo KLIP-TON .....	164
Figura B.4 Procedimiento para la colocación del adhesivo DEVCON.....	164
Figura B.5 Curva carga-desplazamiento obtenida con el adhesivo DEVCON.....	165
Figura B.6 Configuración final de instrumentación con <i>strain gages</i> .....	165
Figura B.7 Preparación e instrumentación de torones .....	166
Figura C.1 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 1.....	167
Figura C.2 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 2.....	167
Figura C.3 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 3.....	168
Figura C.4 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 4.....	168
Figura C.5 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 5.....	168
Figura C.6 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 6.....	169
Figura C.7 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 7.....	169
Figura C.8 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 8.....	169
Figura C.9 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 9.....	170
Figura C.10 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 10.....	170
Figura C.11 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 11.....	170
Figura C.12 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 12.....	171
Figura C.13 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 13.....	171
Figura C.14 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 14.....	171
Figura C.15 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 15.....	172

Figura C.16 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 16.....	172
Figura C.17 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 17.....	172
Figura C.18 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 18.....	173
Figura C.19 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 19.....	173
Figura C.20 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 20.....	173
Figura C.21 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 21.....	174
Figura C.22 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 22.....	174
Figura C.23 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 23.....	174
Figura C.24 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 24.....	175
Figura C.25 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 25.....	175
Figura E.1 Prueba de resistencia a la compresión.....	183
Figura E.2 Prueba de módulo de elasticidad.....	184
Figura E.3 Prueba de resistencia a la flexión.....	185
Figura E.4 Prueba de resistencia a la tensión.....	185
Figura E.5 Prueba de resistencia a la tensión de acero de refuerzo .....	186
Figura E.6 Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero (adaptada de Rodríguez y Botero 1997) .....	187
Figura E.7 Curva esfuerzo-deformación promedio de la barra del No. 5 .....	187
Figura E.8 Curvas esfuerzo-deformación (tomada de Collins y Mitchell 1991) .....	188
Figura E.9 Comparación de curvas esfuerzo-deformación .....	189
Figura F.1 Sección transversal.....	191
Figura G.1 Ubicación de <i>strain gages</i> en el acero de refuerzo .....	196
Figura G.2 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte A.....	197
Figura G.3 Deformaciones unitarias en acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte B.....	198
Figura G.4 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte A.....	199
Figura G.5 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte B.....	200
Figura G.6 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte A.....	203
Figura G.7 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte B.....	204
Figura G.8 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte A.....	205
Figura G.9 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte B.....	206
Figura G.10 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte A.....	208
Figura G.11 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte B.....	209
Figura G.12 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte A.....	210
Figura G.13 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte B.....	211

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe un gran número de estructuras que se construyen con elementos presforzados (pretensados y postensados). Estructuras tales como losas de entrepiso y azotea de vivienda de diversos niveles sociales, pasos vehiculares, tanques de almacenamiento, plataformas petroleras y estructuras principales de centrales hidroeléctricas, entre otras.

Entre las ventajas de utilizar concreto presforzado en comparación con el concreto reforzado convencional están las de lograr diseños de elementos más eficientes y esbeltos, así como optimizar los tiempos de construcción (ANIPPAC 2000). Sin embargo, por naturaleza todos los materiales que constituyen las estructuras tienden a sufrir degradación con el paso del tiempo. Lo ideal es que esta degradación sea nula o mínima para prolongar al máximo la vida útil de las estructuras. Las estructuras presforzadas no son la excepción, tanto el acero de presfuerzo como el concreto experimentan dicho fenómeno.

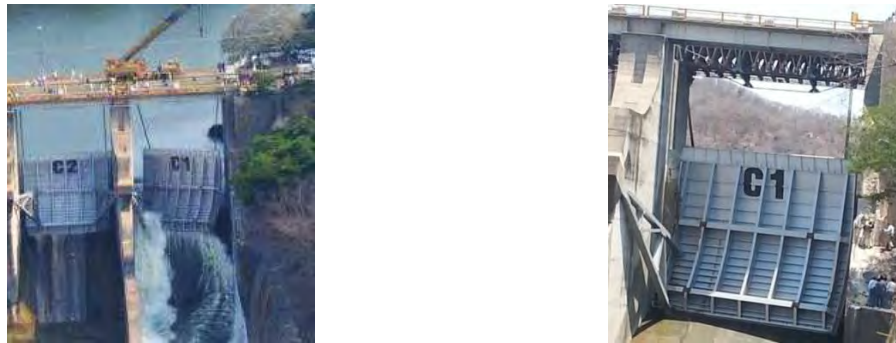
En el caso del presfuerzo, el esfuerzo en los tendones disminuye con el paso del tiempo, primero de forma rápida y después lentamente. La reducción del esfuerzo durante la vida útil del elemento se conoce como *pérdida de presfuerzo*. Existe una gran cantidad de factores ambientales que pueden acelerar considerablemente dicha pérdida. Por ejemplo, una baja humedad relativa puede conducir a una excesiva pérdida de presfuerzo y, por lo tanto, afectar su desempeño en condiciones de servicio (Saiidi *et al.* 1998). Por otro lado, generalmente las estructuras presforzadas de gran magnitud se encuentran en sitios altamente húmedos y en contacto directo con el agua, lo que genera problemas severos de corrosión causando una mayor incertidumbre sobre las condiciones mecánicas del presfuerzo.

Cuando la pérdida de presfuerzo es excesiva, existe una alta probabilidad de que se presenten fallas estructurales importantes. Por esta razón, es fundamental evaluar su condición con el propósito de conocer en la mayor medida de lo posible la fuerza efectiva real del presfuerzo. Dicha información contribuiría sustancialmente en la programación de mantenimientos preventivos y/o correctivos, así como en la decisión de posibles reemplazos de elementos con la finalidad de mantener o incrementar el nivel de seguridad estructural.

En libros de texto (Nilson 1987, Naaman 2004, Raymond y Mickleborough 2005) y manuales de diseño (PCI 2004, NTCC 2004) de concreto presforzado se clasifican las pérdidas de presfuerzo como instantáneas y diferidas. Dada su importancia y las magnitudes que pueden alcanzar estas pérdidas, se han desarrollado metodologías que permiten considerarlas indirectamente al momento de realizar el diseño. No obstante, resulta muy difícil determinar la pérdida de presfuerzo en estructuras existentes como puentes de gran tamaño, tanques de almacenamiento y estructuras vitales de centrales de generación eléctrica que cuentan con varios años de operación, y de las cuales no se tiene información (memorias de cálculo, planos estructurales, etc.) que permita

evaluar indirectamente las condiciones del presfuerzo, es decir, la tensión inicial, edad del tensado y las pérdidas estimadas. Por otro lado, debe tenerse en cuenta que una diferencia importante entre la fuerza real de presfuerzo y la fuerza de diseño puede conducir a problemas severos de servicio y seguridad ocasionando la aparición de deflexiones y grietas excesivas e inesperadas. Asimismo, bajo cargas de servicio, las pérdidas de presfuerzo sobreestimadas pueden conducir a diseños excesivos e ineficientes (Caro *et al.* 2013).

Las fallas locales de elementos presforzados podrían poner en riesgo la integridad global de una estructura, y en algunos casos, detener procesos de operación de gran magnitud como ha ocurrido en el sector eléctrico. En este sector, en los últimos años, se han presentado una serie fallas que han sido consideradas de gran impacto como la falla súbita ocurrida el pasado 31 de mayo del 2013 en la central hidroeléctrica La Villita operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en donde un soporte postensado de la compuerta C1 se desprendió súbitamente (figura 1.1). La falla de este elemento ocasionó daños en la compuerta y el vertido de aproximadamente 730 m<sup>3</sup>/s (Marengo 2014).



**Figura 1.1 Falla en compuerta de la central hidroeléctrica La Villita (tomada de Marengo 2014)**

Otra falla importante ocurrió en mayo del 2000, en donde parte de un puente de una de las principales autopistas de Carolina del Norte en Estados Unidos, se derrumbó matando o hiriendo a varias personas. Las investigaciones revelaron que la causa del colapso fue la corrosión de los tendones debida al uso excesivo de una lechada con cloruro de calcio durante procedimientos de mantenimiento del puente. En la figura 1.2 se muestra la sección derrumbada.



**Figura 1.2 Colapso de puente (tomada de [www.nace.org](http://www.nace.org))**

Como ya se comentó, los procedimientos que actualmente existen para considerar la posible pérdida de presfuerzo debida a factores de diversa índole, son aplicables al instante de llevar a cabo el diseño estructural a través de formulaciones que en su mayoría se han deducido experimentalmente. Sin embargo, en reglamentación nacional e internacional no existen lineamientos normativos que permitan estimar la fuerza efectiva real del presfuerzo de estructuras existentes. Además, es importante señalar que llevar a cabo una simple inspección visual como se realiza comúnmente, no es suficiente para evaluar la condición del presfuerzo, sobre todo cuando el acero de presfuerzo no se encuentra expuesto a la intemperie.

A partir de lo antes descrito, se consideró necesario desarrollar una metodología experimental que permita estimar en campo la fuerza efectiva de presfuerzo desde una perspectiva práctica. En esta etapa el trabajo se limitó a presfuerzo no adherido al concreto.

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo es evaluar en forma experimental la fuerza efectiva de presfuerzo en una estructura, a través del cálculo de la deformación unitaria cuando no se tiene información relacionada con la tensión inicial ni las pérdidas estimadas. Para lograr dicho objetivo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar tres modelos de ensaye de concreto postensado para medir la deformación unitaria en campo. La diferencia entre dichos modelos, es la longitud disponible para realizar las mediciones.
- Determinar curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo a partir de pruebas de tensión realizadas en la máquina universal, utilizando deformímetros electrónicos y un transductor de desplazamiento lineal (LVDT).
- Definir un modelo constitutivo para el acero de presfuerzo utilizado, tomando como base las curvas esfuerzo-deformación determinadas experimentalmente.
- Estimar la fuerza efectiva de muestras de presfuerzo bajo distintas condiciones de carga, midiendo la deformación unitaria con deformímetros electrónicos y transductores de desplazamiento, y relacionándola con los esfuerzos de tensión correspondientes a través de las curvas esfuerzo-deformación determinadas experimentalmente.
- Establecer recomendaciones para estimar la fuerza efectiva de presfuerzo en estructuras reales.

El trabajo de investigación planteado en esta tesis es parte del alcance de un proyecto que llevaron a cabo la CFE y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), cuyo objetivo principal fue “desarrollar una metodología para la estimación de la fuerza efectiva en elementos estructurales presforzados, basada en pruebas experimentales y modelos de elementos finitos

calibrados que permita conocer su grado de seguridad”, en donde se invitó a participar a la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco (UAM-A) mediante un convenio de colaboración para cumplir con dicho objetivo.

## 1.2 REFERENCIAS

1. Caro, L A, J R Martí-Vargas y P Serna (2013), “Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens”, Engineering Structures, Vol. 48, pp. 704-715.
2. Marengo, H M (2014), “Riesgos y desastres naturales”, Proyectos y Construcción, Comisión Federal de Electricidad.
3. Naaman, A E (2004), "Prestressed Concrete Analysis and Design", 2nd Edition, Techno Press 3000, Michigan.
4. Nilson, A H (1987), “Diseño de estructuras de concreto presforzado”, segunda edición, Limusa.
5. NTCC (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre, México.
6. PCI Design Handbook (2004), 6th Edition, Precast / Prestressed Concrete Institute.
7. Raymond, G I y N Mickleborough (2005), “Design of Prestressed Concrete”, 2nd Edition, Taylor & Francis e-Library, London and New York.
8. Reinoso, E, M Rodríguez y R Betancourt (2000), “Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas”, ANIPPAC. México.
9. Saiidi, M, E Hutchens y D Gardella (1998), “Bridge prestress losses in dry climate”, Journal of Bridge Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 111-116.

## **CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES**

### **2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO**

La fuerza de presfuerzo no es constante a lo largo de la vida útil de estructuras presforzadas. Desde el instante que se tensa el acero, la fuerza inducida disminuye por diversas causas denominadas pérdidas de presfuerzo. Como se mencionó en el capítulo 1, estas pérdidas se toman en cuenta al instante de realizar el diseño, a veces en forma precisa, y en otras ocasiones de manera aproximada, según se requiera.

Este tema ha sido muy estudiado a lo largo de los últimos años, lo cual ha sido útil para que sea incluido en recomendaciones de diseño y en la normatividad internacional como es el caso de la Asociación Americana de Carreteras Estatales (AASHTO, por sus siglas en inglés) y el Instituto del Concreto Prefabricado y Presforzado (PCI 2004, por sus siglas en inglés), así como en normatividad nacional tal es el caso de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto (NTCC 2004) y el Manual de Diseño de Estructuras Prefabricadas y Presforzadas (ANIPPAC 2000).

Las pérdidas se clasifican en instantáneas y diferidas o dependientes del tiempo (NTCC 2004, ANIPPAC 2000).

- a) Instantáneas:  
Ocurren inmediatamente durante la construcción del miembro o inmediatamente después.
- b) Dependientes del tiempo (diferidas):  
Ocurren a través de un extenso periodo de tiempo.

Entre las instantáneas se encuentran:

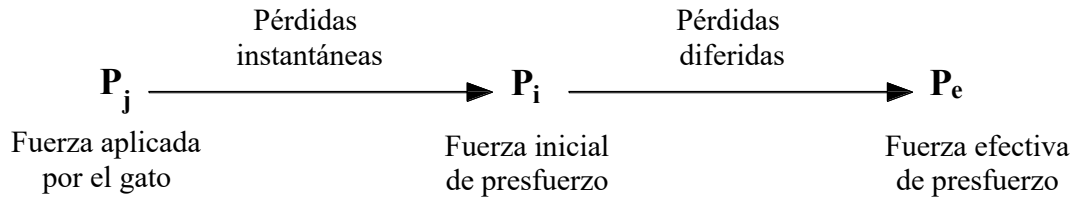
- 1) Acortamiento elástico del concreto debido a la fuerza de presfuerzo
- 2) Fricción entre cables o alambres y los ductos u orificios
- 3) Deslizamiento de las cuñas de anclaje

En lo que respecta a las pérdidas diferidas, se deben a fenómenos de diversa índole que se presentan a lo largo del tiempo, se deben a:

- 1) Acortamiento del concreto por flujo plástico del mismo
- 2) Acortamiento del concreto por contracción o retracción del mismo
- 3) Relajamiento del presfuerzo

El cálculo refinado de estas pérdidas de forma independiente resulta complicado, debido a la estrecha dependencia que existe entre ellas, y a que su presencia o su magnitud dependen de que se use la técnica del pretensado o del postensado. Por ejemplo, el relajamiento del esfuerzo en los

tendones es afectado por los cambios de longitud debido al flujo plástico del concreto. La velocidad del flujo plástico, por su parte, es afectada por el cambio del esfuerzo en el tendón. Sin embargo, a través de intensos trabajos de investigación se ha logrado definir formulaciones prácticas para su consideración en el diseño estructural (PCI 2004, NTCC 2004). En la figura 2.1 se ilustra la relación entre las fuerzas y las pérdidas en un elemento presforzado.



**Figura 2.1 Pérdida de presfuerzo (adaptada de Raymond y Mickleborough 2005)**

donde

- $P_j$  fuerza inducida al acero de presfuerzo por el gato
- $P_i$  fuerza (inicial) restante después de las pérdidas instantáneas (fase inicial o de transmisión)
- $(P_j - P_i)$  representa las pérdidas instantáneas
- $P_e$  fuerza (efectiva) que queda después de pérdidas totales (instantáneas más diferidas, fase final o de servicio)
- $(P_i - P_e)$  representa las pérdidas diferidas o dependientes del tiempo

## 2.2 ESTADO DEL ARTE DE TÉCNICAS EMPLEADAS PARA ESTIMAR LAS PÉRDIDAS Y LA FUERZA EFECTIVA DE PRESFUERZO EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

Se llevó a cabo una revisión del estado del arte sobre las técnicas destructivas y no destructivas que, a largo de los últimos años, han sido utilizadas para estimar la fuerza efectiva de presfuerzo en una estructura existente. A continuación, se describen las que se consideraron más importantes.

### 2.2.1 Método fuerza-desplazamiento

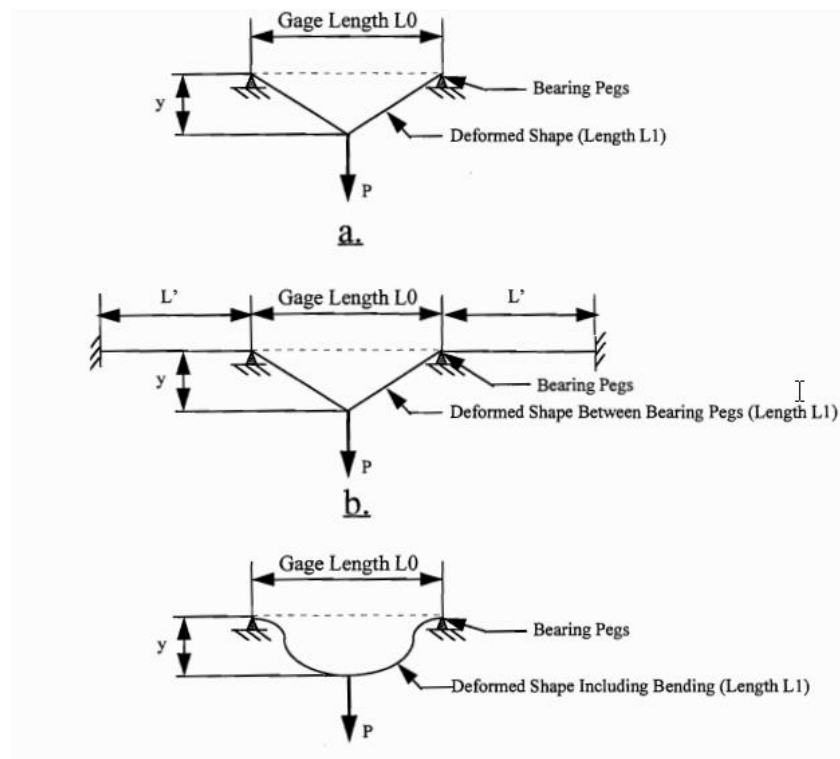
Civjan *et al.* (1995) desarrollaron un proyecto de investigación denominado “método para evaluar el presfuerzo remanente en vigas dañadas de puentes presforzados”, en el que se elaboró un dispositivo que con la aplicación de una fuerza transversal incremental al torón y la medida de la deflexión resultante, era capaz de estimar la fuerza de tensión del torón. Las características especiales del dispositivo que los autores destacan son su simplicidad, portabilidad y versatilidad.



El objetivo de su estudio fue desarrollar una herramienta sencilla y económica para ser utilizada en campo durante la evaluación de daños en vigas de puentes.

Además, hacen énfasis sobre la necesidad de contar con un dispositivo que en conjunto con la inspección visual permita definir niveles de daño y, su vez, ayuden a tomar decisiones correctivas y/o preventivas.

Realizaron varias pruebas para verificar la precisión de su dispositivo obteniendo buenos resultados. En la figura 2.2 se ilustra esquemáticamente el método en que basaron su trabajo.



**Figura 2.2 Método esquemático fuerza lateral-deflexión (Civjan *et al.* 1995)**

Después de varias pruebas definieron la geometría final del prototipo (figura 2.3). Elaboraron dos dispositivos para determinar la longitud de calibración ideal, siendo finalmente la de doce pulgadas la que les dio mejores resultados. Para la definición final del prototipo, los autores tomaron en cuenta parámetros como: la fricción en los puntos de apoyo del dispositivo con el torón, la estabilidad propia del equipo y longitud disponible del torón.

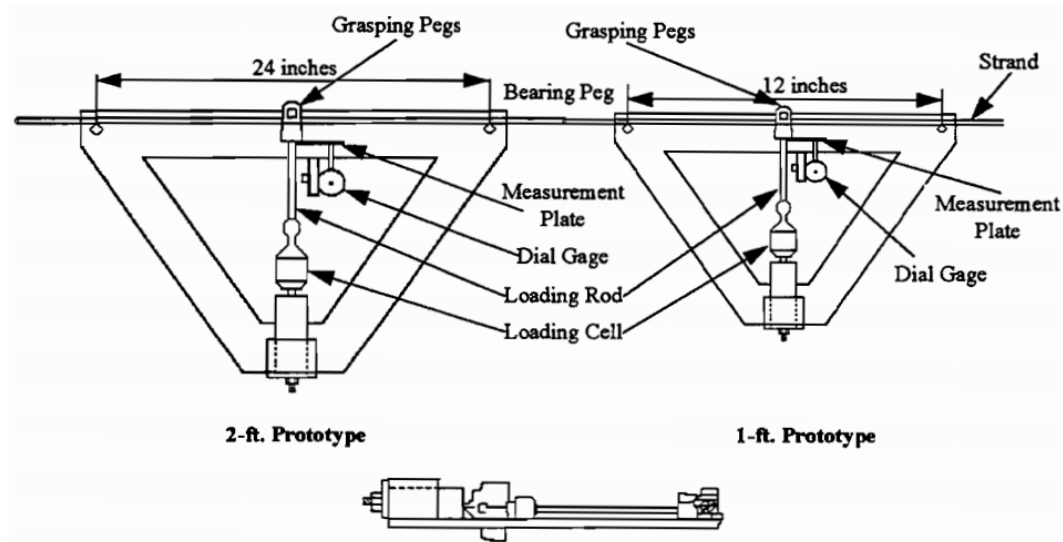
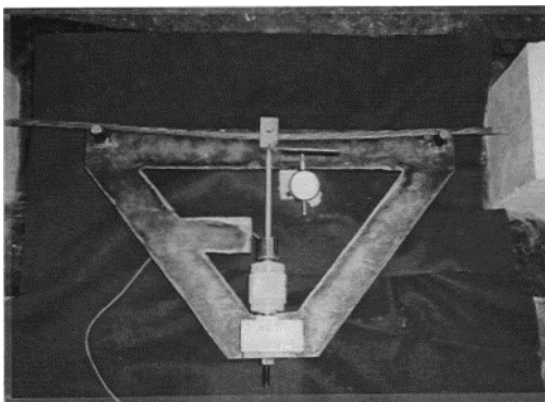


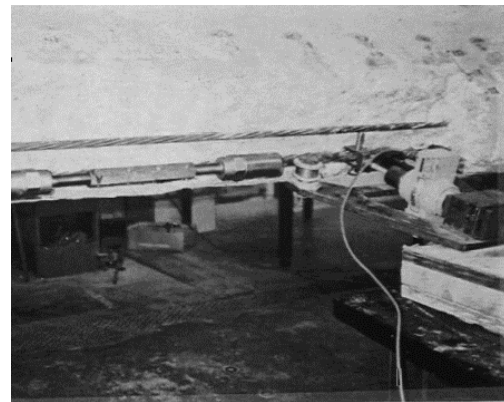
Figura 2.3 Prototipo (Civjan *et al.* 1995)

Como se observa en la figura 2.3, la carga aplicada se mide a través de una celda carga y el desplazamiento por medio de un transductor de desplazamiento. La precisión que los autores buscaron fue que la fuerza de tensión medida no se desviara en más del 10% de la fuerza real del torón. Para ello, las lecturas en el transductor debían ser altamente precisas.

Otro alcance de la investigación fue evaluar la efectividad de los empalmes, los cuales aún son utilizados en la práctica del presfuerzo con fines de restituir los tramos de torón dañado, y el interés principal de su investigación en esta parte fue asegurarse que ya colocado tuviese la fuerza de tensión esperada (figura 2.4b). Al final, evaluaron los resultados medidos con el dispositivo y los compararon con los obtenidos a través de *strain gages* y transductores de desplazamiento, en donde de acuerdo con dichos autores los resultados indicaron magnitudes muy similares en los tres métodos. En las figuras 2.4a y 2.4b se ilustra el dispositivo en operación.



a) Calibración del dispositivo



b) Evaluación de la fuerza en empalmes

Figura 2.4 Dispositivo en operación (Civjan *et al.* 1995)

### 2.2.2 Investigación NCHRP (1999)

En 1999 el Programa Nacional de Cooperación e Investigación de Carreteras (NCHRP, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos, llevó a cabo un trabajo de investigación con la finalidad de identificar y estudiar las distintas tecnologías no destructivas más relevantes que existían en ese momento en todo el mundo. Esto se hizo con la finalidad de establecer una metodología que a corto plazo definiera de forma cuantitativa y precisa la pérdida de la sección transversal del presfuerzo en puentes como consecuencia del envejecimiento y degradación estructural.

La tabla 2.1 muestra los métodos identificados y evaluados por el NCHRP, en donde se puede apreciar que prácticamente todos se basaban en pruebas no destructivas a través de sensores. La evaluación paramétrica que realizaron con todas estas técnicas fue muy detallada. Parte de los parámetros que evaluaron fueron: tiempo y costo de desarrollo, seguridad del usuario, complejidad de la operación y forma de adquirir los datos.

**Tabla 2.1 Métodos evaluados por el NCHRP (1999)**

<b>Método</b>	<b>Tipo de sensor</b>
Detección ultrasónica directa	Piezoeléctrico
Vibro-acústica no lineal	Ultrasonido acústico
Monitoreo de Emisiones Acústicas	Acelerómetro
Corrientes inducidas pulsadas	Sonda de inducción electromagnética
Instrumentación ETDR	Cable coaxial
Resistividad Espectral de Superficie	Sonda de Resistividad
Fuga magnética automatizada de flujo	Sensor Hall
Radar de penetración de suelo con enfoque de potencia	Antena Electromagnética
Imágenes radiográficas	Fuente radiográfica
Medición Reflectométrica de Impulso (RIMT)	Cable propio
Medición de esfuerzos en tendones basada en difracción de rayos X	Difractómetro de Rayos X
Medidas de presfuerzo basadas en deformación	Desplazamiento/deformación

El resultado de la investigación concluyó que ninguna técnica era capaz de llevar a cabo la evaluación del presfuerzo con la precisión buscada. No obstante, algunas de ellas han evolucionado en los últimos años haciendo viable su aplicación.

### 2.2.3 Emisiones acústicas (EA)

Se considera como un método de monitoreo "pasivo" en el cual el sistema de detección espera la aparición y captura de emisiones de ondas de esfuerzo asociadas con grietas, corrosión o ruptura de alambres.

A la fecha, este método sigue siendo objeto de investigación para mejorar la precisión y confiabilidad de sus resultados. Entre los trabajos recientes se encuentra el realizado por Yuyama y Ohtsu (2011) quienes probaron vigas de concreto con tres tipos de presfuerzo: barras de acero, torones y cables, considerando tres distintas condiciones: no adherido, parcialmente adherido, y totalmente adherido. A los especímenes analizados les indujeron corrosión artificial, encontrando que señales de emisión acústica con amplitudes extremadamente altas son generadas por la ruptura de los tendones. Finalmente, concluyeron que la probabilidad de detectar la falla oscila entre el 82 y 86%.

Por su parte, Perrin *et al.* (2009) instrumentaron especímenes mediante una serie de sensores de emisión acústica, y de igual forma indujeron corrosión a los especímenes estudiados. De acuerdo con sus resultados, la técnica de emisión acústica tiene la capacidad de detectar cuatro etapas de corrosión, incluso uno de los sensores empleados previo a la falla total mostró la capacidad de detectar la propagación de grietas en el acero de presfuerzo a causa de la corrosión. Los autores concluyeron que esta técnica es altamente recomendable para detectar la presencia de corrosión en el presfuerzo. En la figura 2.5 se ilustra su modelo experimental.

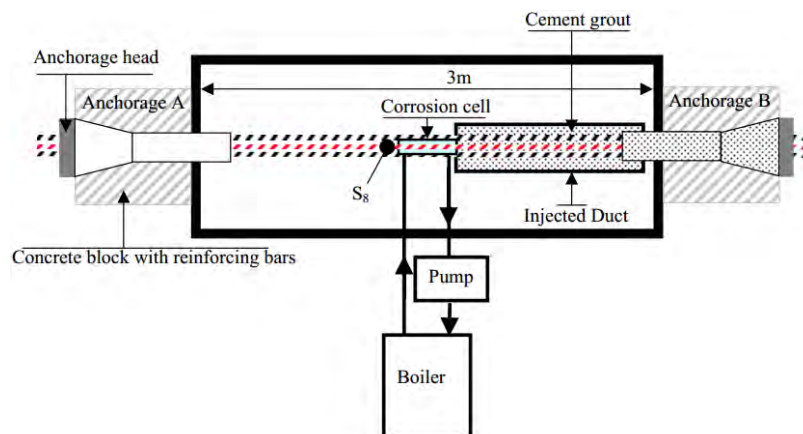


Figura 2.5 Estructura real y conjunto experimental (Perrin *et al.* 2009)

#### 2.2.4 Parámetros dinámicos de la estructura

Se han realizado diversas investigaciones en donde se ha intentado relacionar el cambio de los parámetros dinámicos de las estructuras con pérdidas de presfuerzo, principalmente en estructuras de puentes. Uno de los primeros intentos es el realizado por Saiidi *et al.* (1994), cuyo modelo consistió en una viga simplemente apoyada sujeta a una fuerza axial producida por el tendón de presfuerzo. Su trabajo se centró en intentar relacionar el valor de la fuerza axial actuante con las frecuencias naturales de la viga.

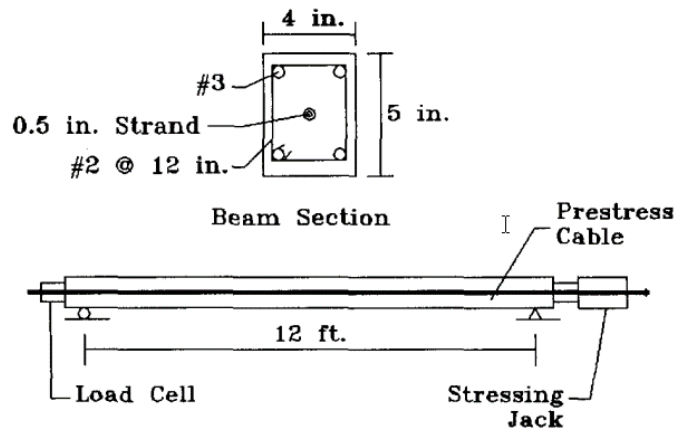
De acuerdo con Saiidi *et al.* (1994), para una viga prismática simplemente apoyada, la solución de la ecuación de equilibrio dinámico después de la aplicación de condiciones de frontera conduce a la siguiente ecuación para la frecuencia natural de vibración:

$$\omega_n^2 = -\left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 \frac{EI}{m} \quad (2.1)$$

donde

- n      número de modo
- L      longitud del claro
- N      fuerza de compresión axial (positiva)
- m      masa de la viga por unidad de longitud
- E      módulo de elasticidad
- I      momento de inercia de la sección de la viga

En la figura 2.6 se ilustran las dimensiones de la viga ensayada por Saiidi *et al.* (1994).



**Figura 2.6 Modelo de prueba (Saiidi *et al.* 1994)**

Los autores concluyeron que el cambio en la frecuencia natural de la viga estudiada es muy pequeño, y por lo tanto, no es factible emplear los datos de vibración para determinar la pérdida actual de presfuerzo. Parte de las limitaciones de su trabajo fue que las vigas se agrietaron durante las pruebas.

Más tarde, Jeong *et al.* (2003) analizaron estructuras muy similares a las trabajadas por Saiidi *et al.* (1994). Dichos autores formularon un modelo analítico para identificar la relación entre los cambios de las frecuencias naturales y la pérdida de presfuerzo, además, propusieron un algoritmo para estimar la pérdida de presfuerzo utilizando sólo algunas de las frecuencias naturales. Los autores aplicaron su modelo analítico a una estructura de prueba, obteniendo buenos resultados.

Recientemente, de forma paralela a esta tesis se continuó con el trabajo de Saiidi *et al.* (1994) en la UAM-A. Los detalles de dicha investigación se encuentran en Archundia *et al.* (2017).

### 2.2.5 Cuerdas vibrantes

Esta técnica se realiza mediante extensómetros de cuerda vibrante que son dispositivos de alta precisión para medir deformaciones en el acero y el concreto.

López y Kahn (2007) realizaron mediciones de deformación axial usando estos dispositivos en torones de presfuerzo de vigas tipo AASHTO elaboradas con concreto ligero de alta resistencia. La finalidad de las mediciones fue estimar las pérdidas de presfuerzo reales y compararlas con las calculadas teóricamente con los métodos: AASHTO, PCI y ACI-209.

El planteamiento inicial de los autores fue colocar los sensores desde la construcción de las vigas. No obstante, de acuerdo a las características técnicas de los sensores también pueden ser utilizados para medir deformaciones en estructuras existentes. En la figura 2.7 se muestra la colocación dichos dispositivos.



Figura 2.7 Medición de deformaciones en vigas pretensadas (López y Kahn 2007)

## 2.3 COMENTARIOS

A pesar de que la metodología propuesta en este trabajo se trata de una técnica destructiva dado que considera la extracción de especímenes de presfuerzo, algunos investigadores (Caro *et al.* 2013) la mencionan como una alternativa más para determinar pérdidas de presfuerzo. Sin embargo, en la literatura consultada no se encontraron trabajos de investigación donde se haya llevado a la práctica.

Los resultados obtenidos con la técnica propuesta en este trabajo pueden ser más precisos en comparación con otras técnicas no destructivas, ya que en caso de existir pérdida de sección transversal o determinado nivel de corrosión en los tendones, estos efectos estarían considerados implícitamente. Asimismo, a pesar de utilizar *strain gages* y transductores de desplazamiento en la metodología propuesta, se considera que son dispositivos de costo accesible en comparación con los sensores que se utilizan en otras técnicas como es el caso de la emisión acústica.

La mayoría de las técnicas no destructivas descritas en este capítulo han sido utilizadas para comparar resultados teóricos con experimentales, principalmente pérdidas de presfuerzo y no precisamente para evaluar estructuras existentes como es el objetivo de este trabajo. No obstante, en trabajos futuros afines a esta investigación se considera conveniente utilizar algunas de ellas. Por ejemplo, utilizar cuerdas vibrantes para medir las deformaciones unitarias y/o reproducir el dispositivo fuerza-desplazamiento elaborado por Civjan *et al.* (1995) utilizando dispositivos de medición más actualizados (celdas de carga y transductores de desplazamiento) y perfeccionando el método de medición.

## 2.4 REFERENCIAS

1. ACI-Committee#209 (1997), "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", in ACI Manual of Concrete Practice. American Concrete Institute: Farmington Hills, MI. p. 209R.1-209R.47.
2. Archundia Aranda, H I, M E Ruiz Sandoval Hernández, E G Esquivel García y J D Rivera Castro (2017), "Correlación entre la frecuencia fundamental de vibración y el nivel de presfuerzo", Reporte de Investigación hecho para la Gerencia de Ingeniería Civil del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
3. Caro, L A, J R Martí-Vargas y P Serna (2013), "Prestress losses evaluation in prestressed concrete prismatic specimens", Engineering Structures, Vol. 48, pp. 704-715.
4. Civjan, S A, J O Jirsa, R L Carrasquillo y D W Fowler (1995), "Method to evaluate remaining prestress in damaged prestressed bridge girders", Research Report 1370-2 Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
5. Jeong-Tae, K, Y Chung-Bang, R Yeon-Sun y C Hyun-Man (2003), "Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, No. 3-4, pp. 467-482.
6. Lopez, M y F Kahn (2007), "High performance lightweight concrete - a comparison between actual prestress losses and design code estimates", Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 22, No. 1.
7. NCHRP (1999), "Nondestructive Methods for Condition Evaluation of Prestressing Steel Strands in Concrete Bridges", Final Report Phase I: Technology Review. NCHRP Web Document 23 (Project 10-53).
8. NTCC (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre, México.

9. PCI Design Handbook (2004), 6th Edition, Precast / Prestressed Concrete Institute.
10. Perrin, M, L Gaillet, C Tessier y H Idrissi (2009), “Acoustic Emission use for prestressing strands corrosion assessment”, Non-Destructive Testing in Civil Engineering.
11. Post-tensioning manual (2006), 6th Edition, Post-tensioning Institute, PTI Publications.
12. Raymond, G I y N Mickleborough (2005), Design of Prestressed Concrete, 2nd Edition, Taylor & Francis e-Library, London and New York.
13. Reinoso, E, M Rodríguez y R Betancourt (2000), “Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas”, ANIPPAC. México.
14. Saiidi, M, B Douglas, y S Feng (1994), “Prestressforce effect on vibration frequency of concrete bridges”, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2241.
15. Yuyama, S y M Ohtsu (2011), “Failure Detection of High-Strength Tendons in Prestressed Concrete Bridges by AE”, ISSR Journals, Vol. 2, No. 3, pp. 295-299.



## CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYE

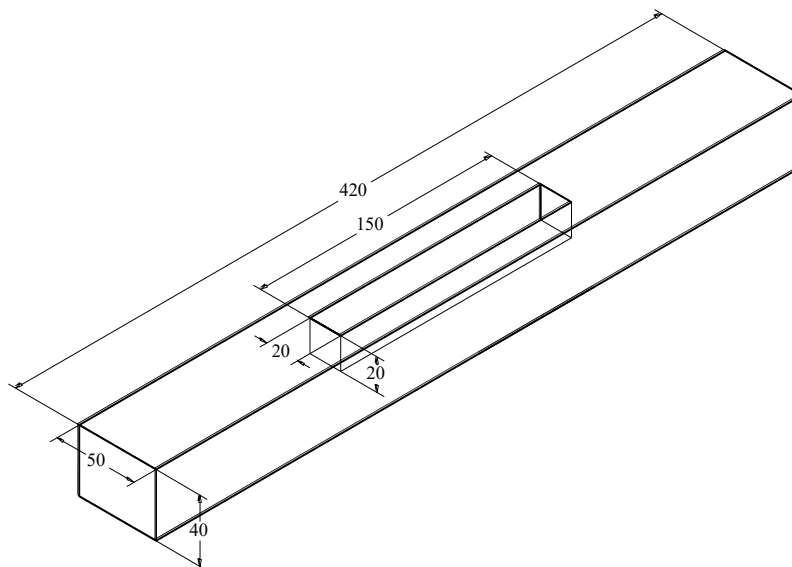
En este capítulo se discute el diseño y construcción de los modelos de ensaye, que fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación. Estos modelos consistieron en traveses postensados, cuya geometría se definió de tal forma que permitiera y facilitara la instrumentación de las muestras de torón considerando un vacío (espacio sin concreto) en el centro de sus claros. Para determinar sus dimensiones, se tomó en cuenta la disponibilidad de espacios dentro y fuera del laboratorio.

Se utilizaron traveses como modelos de ensaye porque su geometría facilitó la realización de las pruebas en los torones. Además, este tipo de elementos estructurales son de los que más se postensan en la práctica profesional, por lo que se consideran representativos de diversas obras civiles.

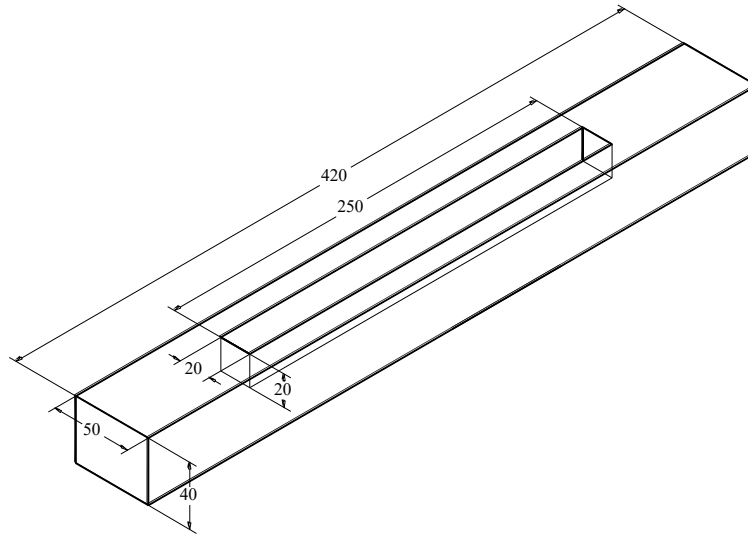
En cuanto al tipo de presfuerzo empleado, se optó por considerar sólo torones desadheridos del concreto debido a que en éstos se simplifican los trabajos de instrumentación en comparación con los torones adheridos.

### 3.1 IDENTIFICACIÓN

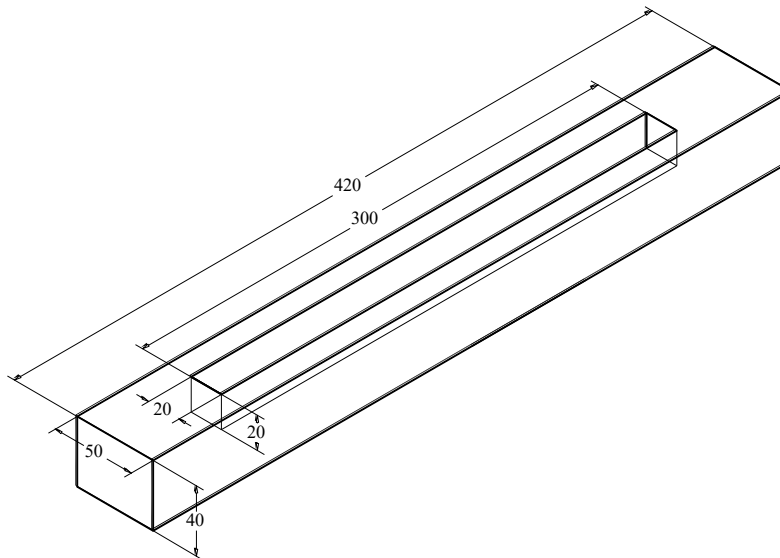
Los modelos se identificaron como: TP-150, TP-250, y TP-300. Donde “TP” se refiere a Traveses Postensados, y el número consecutivo indica la longitud disponible para instrumentar en el centro del claro. Sus geometrías se presentan en las figuras 3.1 a 3.3.



**Figura 3.1 Modelo TP-150 (dimensiones en cm)**



**Figura 3.2 Modelo TP-250 (dimensiones en cm)**



**Figura 3.3 Modelo TP-300 (dimensiones en cm)**

### **3.2 MATERIALES EMPLEADOS**

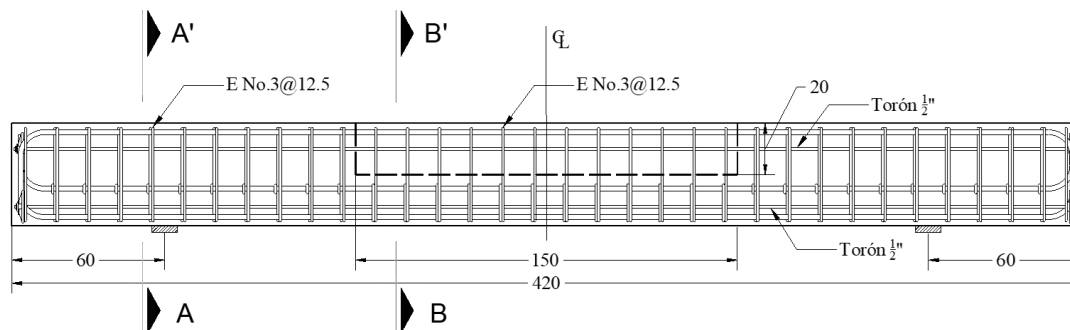
Los materiales empleados fueron concreto, acero de presfuerzo y acero de refuerzo ordinario. Este último, con el propósito de: 1) restringir agrietamiento por maniobras y cambios de temperatura, 2) proporcionar confinamiento al concreto y 3) contribuir en la resistencia de los especímenes. En la tabla 3.1 se presentan las características de los materiales.

**Tabla 3.1 Materiales**

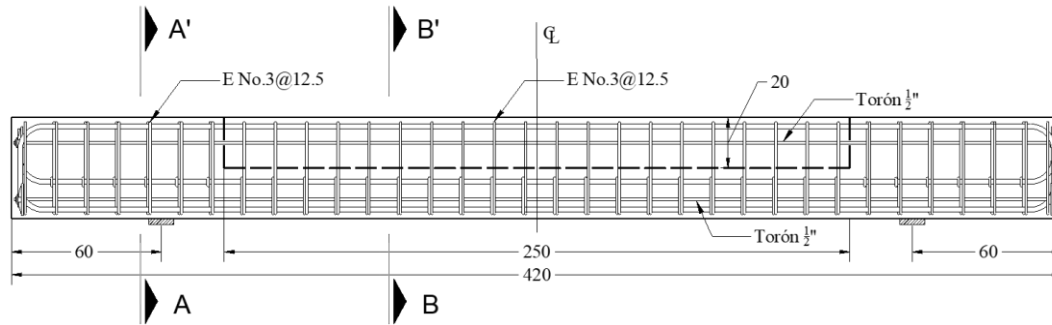
<b>Concreto</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concreto premezclado</li> <li>• Resistencia a la compresión, <math>f'_c</math>: 350 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Revenimiento: 12 cm</li> </ul>
<b>Acero de presfuerzo (torones)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro: 1.27 cm</li> <li>• Área nominal: 0.987 cm<sup>2</sup></li> <li>• Esfuerzo de ruptura, <math>f_{pu}</math>: 19000 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad, <math>E_p</math>: 1.96 x 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Baja relajación</li> <li>• Formado por 7 alambres</li> <li>• Desadherido del concreto</li> </ul>
<b>Acero de refuerzo ordinario</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esfuerzo de fluencia, <math>f_y</math>: 4200 kg/cm<sup>2</sup></li> <li>• Módulo de elasticidad, <math>E</math>: 2 x 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup></li> </ul>

### 3.3 ARMADOS

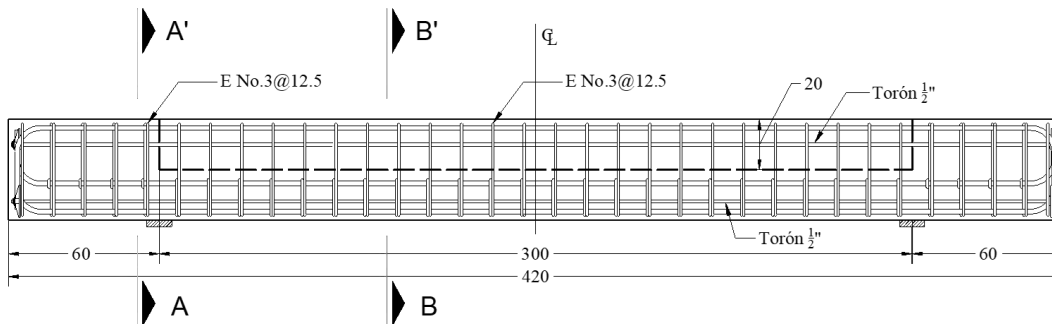
Los armados que se utilizaron en la construcción de los modelos de ensaye se muestran en la figura 3.4. Como se puede apreciar, entre ellos sólo varió el tipo de estribo y su distribución al centro del claro en función de la longitud disponible para instrumentar.



**a) Modelo TP-150**



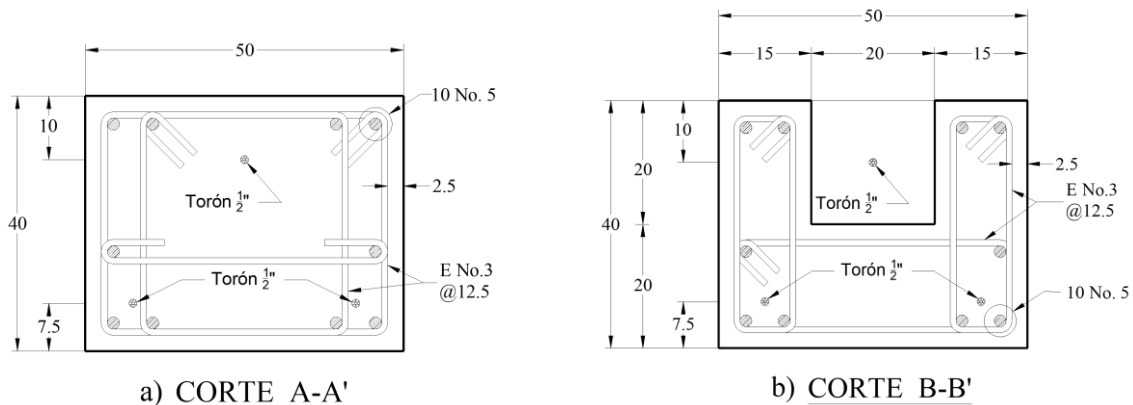
**b) Modelo TP-250**



**c) Modelo TP-300**

**Figura 3.4 Armados de modelos de ensaye (dimensiones en cm)**

Para los tres modelos, se tienen dos tipos de secciones transversales identificadas como corte A-A' y corte B-B' en la figura 3.5. La primera de ellas consiste una sección rectangular de 50 cm x 40 cm, en donde el refuerzo longitudinal consta de 10 barras del No.5 y el refuerzo transversal lo constituyen 2 estribos y una grapa elaborados con barras del No.3. Para el caso de la segunda sección se tiene un hueco de 20 cm x 20 cm, el refuerzo longitudinal está compuesto por 10 barras del No.5 y el refuerzo transversal por 3 estribos elaborados con barras del No.3.



**Figura 3.5 Secciones transversales (dimensiones en cm)**

### 3.4 CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO

El cálculo de pérdidas de presfuerzo se detalla en el apéndice F. Después de las pérdidas inmediatas se obtuvo un esfuerzo efectivo de  $12620 \text{ kg/cm}^2$  y consideradas las pérdidas totales de  $11718 \text{ kg/cm}^2$ .

### 3.5 MODELOS NUMÉRICOS

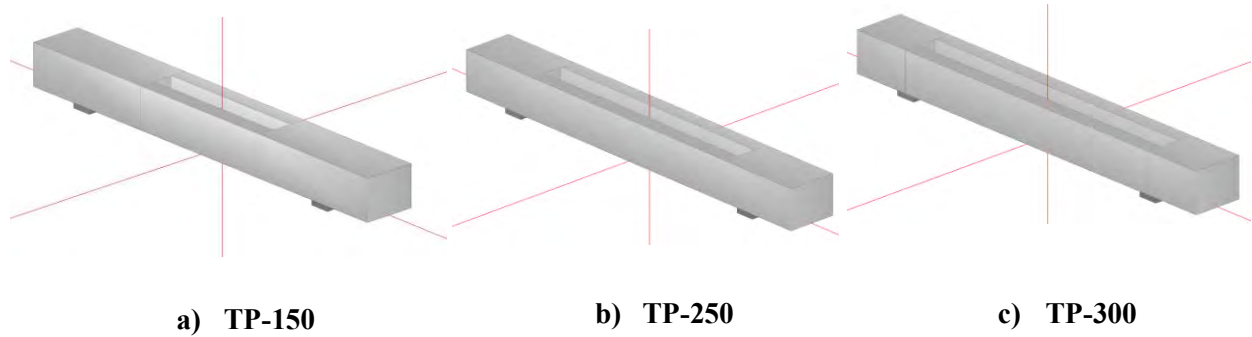
Se utilizó el programa Concise Beam en su versión 4.59x (2016). Es un programa especializado en el diseño de elementos de concreto pretensado desarrollado por la empresa Black Mint Software de Canadá, el cual se identifica en este documento como CONCISE. Se utilizó este programa para el diseño de los modelos de ensaye debido a que no se contó con alguno que diseñara elementos postensados. Por esta razón, los porcentajes de pérdida inicial y final se calcularon de forma externa y se introdujeron en el programa para ser considerados de forma directa en los diseños.

La principal limitante del programa es que considera los torones adheridos al concreto. Sin embargo, tomando en cuenta que los modelos son relativamente robustos, esta consideración no es trascendente dado que la diferencia de considerar el torón adherido y desadherido es evidente después del agrietamiento, particularmente en el estado límite último.

El diseño se realizó para dos casos en las etapas de transferencia (cuando se transfieren los esfuerzos al concreto) y final (condiciones de servicio tomando en cuenta esfuerzos permisibles, deformaciones y agrietamientos, así como condiciones de resistencia última). En el primero, se consideraron sólo los dos torones inferiores que serían permanentes en los modelos de ensaye como se ilustra más adelante en la figura 3.22a, y en la otra, se adicionó un tercer torón en la parte superior que se tensaría al momento de realizar las pruebas de medición de deformaciones unitarias (figura 3.22b). En todos los casos, los torones de presfuerzo se modelaron rectos y adicionalmente se consideró el acero de refuerzo ordinario ilustrado en la figura 3.5.

De acuerdo con el código utilizado (ACI 318 2011), inmediatamente después de la transferencia el esfuerzo admisible en el concreto es de  $0.6f'_c$  para las fibras extremas en compresión y de  $3\sqrt{f'_c}$  para las fibras en tensión, excepto en los extremos de los elementos simplemente apoyados donde se permite un máximo de  $0.7f'_c$  para las fibras extremas en compresión y  $6\sqrt{f'_c}$  para fibras en tensión. Para el caso de cargas de servicio, se permite un esfuerzo de  $0.45f'_c$  para compresión bajo cargas sostenidas y de  $0.60f'_c$  para compresión bajo cargas totales. En todos los casos las unidades de  $f'_c$  son psi.

Para evitar obstruir las maniobras durante las pruebas de tensado, se decidió desplazar los apoyos 60 cm a partir de los extremos hacia el centro como se observa en la figura 3.6.



**Figura 3.6 Modelos en el programa CONCISE**

El diseño por resistencia no tuvo tanto impacto ya que sólo se consideró como carga el peso propio. Sin embargo, el torón superior se tensaría a esfuerzos importantes, por lo que la revisión del estado de esfuerzos en el concreto resultó ser importante. En la tabla 3.2 se presenta un resumen del diseño de las traveses considerando únicamente los dos torones inferiores para la etapa de transferencia.

**Tabla 3.2 Resumen de diseño con los dos torones inferiores en la etapa de transferencia**

<b>Modelo</b>	<b>Diseño a flexión</b>		<b>Deflexiones</b>	<b>Revisión de esfuerzos</b>			
	$M_R$ 0.5L [ton-m]	$M_U$ 0.5L [ton-m]		0.2L [kg/cm <sup>2</sup> ]		0.5L [kg/cm <sup>2</sup> ]	
TP-150	+21.99	+0.51	+0.44	F.S	F.I	F.S	F.I
TP-250	+21.99	+0.48	+0.45	-8.53	+31.19	-6.1	+29.88
TP-300	+21.99	+0.47	+0.45	-8.94	+32.04	-6.3	+30.06
Admisibles			17.5	-8.98	+32.11	-6.4	+30.08
				-26.63	+196.04	-13.31	+168.1

\* F.I = Fibra Inferior, F.S = Fibra Superior

\* Esfuerzos negativos indican tensión y positivos compresión

\* L= Longitud del claro

\*  $M_R$ = Momento Resistente

\*  $M_U$ = Momento Último

En la tabla 3.2 sólo se muestran los resultados correspondientes al centro del claro (0.5L) y en un punto cercano a uno de los extremos (0.20L). No obstante, el diseño se realizó para toda la longitud de los modelos. Como se aprecia en los resultados, se cumplió con la revisión de los estados límite de servicio y de falla. Por otro lado, el resumen de diseño donde se adicionó el torón superior se presenta en la tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Resumen de diseño con los tres torones en la etapa de transferencia**

<b>Modelo</b>	<b>Diseño a flexión</b>		<b>Deflexiones</b>	<b>Revisión de esfuerzos</b>			
	$M_R$ 0.5L [ton-m]	$M_U$ 0.5L [ton-m]	0.5L [mm]	0.2L [kg/cm <sup>2</sup> ]		0.5L [kg/cm <sup>2</sup> ]	
				F.S	F.I	F.S	F.I
TP-150	+22.29	+0.51	+0.17	+5.41	+28.66	+15.2	+25.5
TP-250	+22.29	+0.48	+0.15	+12.34	+27.74	+15.2	+25.7
TP-300	+22.29	+0.48	+0.15	+12.34	+27.74	+14.99	+24.68
Admisibles			17.5	+196.04	+196.04	+168.1	+168.1

\* F.I = Fibra Inferior, F.S = Fibra Superior

\* Esfuerzos negativos indican tensión y positivos compresión

\* L= Longitud del claro

\*  $M_R$ = Momento Resistente

\*  $M_U$ = Momento Último

En el diseño donde se consideró el efecto de los tres torones, las deflexiones disminuyeron y los esfuerzos en las fibras superior e inferior para toda la longitud del elemento resultaron ser de compresión, incluso los esfuerzos de la fibra superior disminuyeron ligeramente debido a la redistribución de esfuerzos. Sin embargo, pese a que no excedieron los máximos esfuerzos admisibles en el concreto, el diseño se consideró apropiado.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los diseños bajo las dos condiciones, en las etapas de transferencia y final, se concluyó que los armados propuestos eran apropiados. Sin embargo, la irregularidad de la sección transversal al centro del claro generó incertidumbre sobre la distribución de esfuerzos, por lo que se consideró apropiado llevar a cabo una revisión más refinada realizando, al menos, un modelo de elementos finitos en el programa ANSYS, en donde además se pudiese considerar a los torones desadheridos al concreto. El modelo se describe en la siguiente sección.

### 3.6 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se llevaron a cabo análisis lineales y no lineales del espécimen TP-250 con el programa ANSYS. Para ello, se realizaron dos modelos bajo las condiciones discutidas en la sección anterior definidos como TP-250 T2 (dos torones) y TP-250 T3 (tres torones). En ambos casos, los resultados fueron comparados con los obtenidos antes con el programa CONCISE, en la etapa de transferencia. No se consideró relevante realizar la revisión en la etapa final puesto que la carga muerta y la carga viva son nulas.

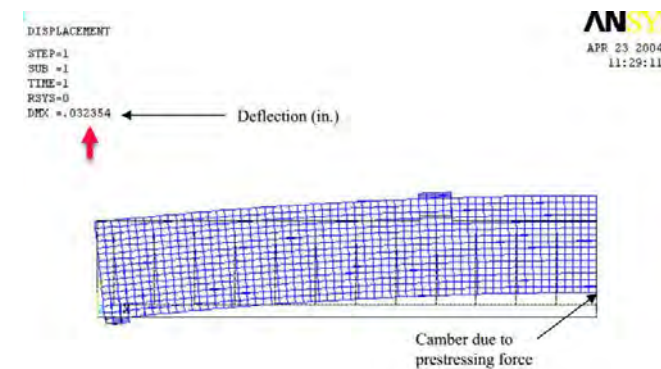
De acuerdo con diversos trabajos realizados (JinWoo 2012, Mohanamurthy 2013 y Haque 2014) ANSYS es capaz de predecir el comportamiento no lineal de estructuras de concreto presforzado. Para considerar los efectos del presfuerzo en dicho programa existen principalmente dos opciones, la primera de ellas es considerando efectos de temperatura y, la otra más recomendable, es proporcionando una deformación unitaria inicial al acero de presfuerzo. No obstante, en dichas

técnicas el torón se considera adherido al concreto. Uno de los trabajos más completos al respecto, es el de Wolanski (2004) quien modeló una trabe de concreto pretensado asignando una deformación unitaria al presfuerzo.

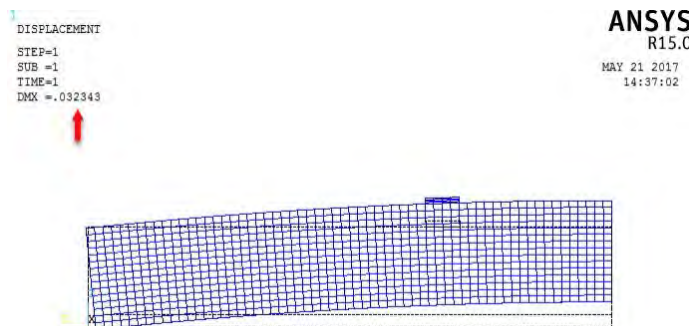
Para familiarizarse con los criterios de modelado del presfuerzo, se reprodujo el modelo de Wolanski (2004). Los resultados conseguidos fueron prácticamente los mismos a los de dicho autor como se precia en la tabla 3.4 y en la figura 3.7, en donde se comparan las deflexiones. No obstante, en los modelos TP-250 T2 y TP-250 T3 debía considerarse el torón desadherido del concreto.

**Tabla 3.4 Comparación de deflexiones entre el modelo de Wolanski (2004) y el modelo reproducido**

Modelo	Condición	Deflexión [mm]
Wolanski (2004)	Sólo efecto del presfuerzo	0.822
Reproducido		0.821
Wolanski (2004)	Agregado el peso propio	0.536
Reproducido		0.534



**a) Modelo Wolanski (2004)**

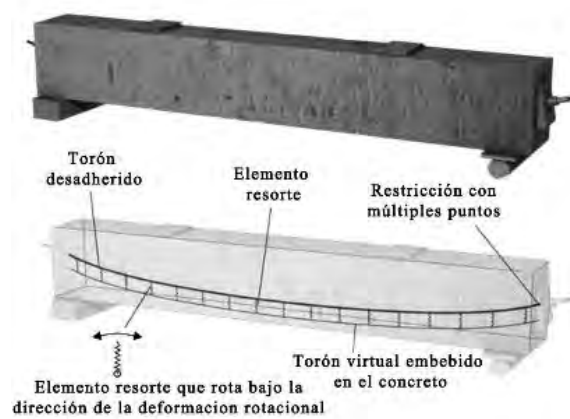


**b) Modelo reproducido**

**Figura 3.7 Comparación de deflexiones considerando sólo el efecto del presfuerzo**



En cuanto a las técnicas que se han utilizado para considerar el torón desadherido, se encuentra el trabajo realizado por Abdulamier *et al.* (2013), quienes utilizaron elementos de contacto (TARGET 170 y CONTA 175) en el programa ANSYS.



**Figura 3.8 Modelado de torones desadheridos utilizando un sistema de resortes  
(adaptada de Huang *et al.* 2009)**

Por su parte, Huang *et al.* (2009) modelaron la no adherencia entre los nodos del presfuerzo y el concreto con un sistema de resortes. A cada resorte, le asignaron una rigidez suficiente para permitir su giro sin tener deformaciones axiales y de flexión, para ello utilizaron el programa ABACUS (figura 3.8). Esta técnica es la que se utilizó en este trabajo.

### 3.6.1 TIPOS DE ELEMENTOS

En la tabla 3.5 se muestran los tipos de elementos que se utilizaron en ANSYS para caracterizar los distintos materiales.

**Tabla 3.5 Tipos de elementos**

<b>Tipo de material</b>	<b>Elemento ANSYS</b>
Acero de refuerzo ordinario	Link 180
Acero de presfuerzo	Link 180
Concreto	Solid 65
Placas de acero	Solid 185
Resortes	Combin14

#### 3.6.1.1 Acero de refuerzo ordinario

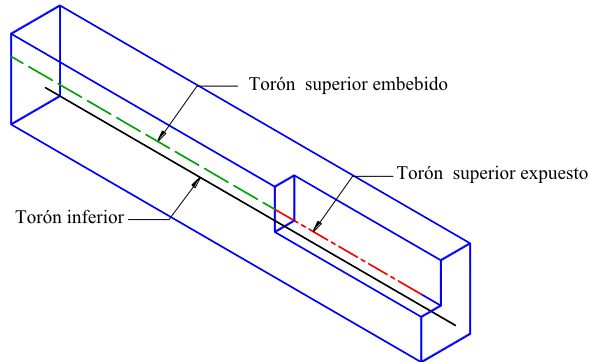
Se consideró acero de refuerzo longitudinal con un área de  $1.98 \text{ cm}^2$  y transversal con  $0.71 \text{ cm}^2$ . Para modelarlos, se empleó un modelo bilineal de comportamiento idéntico en tensión y compresión. Dicho modelo, llamado BISO en ANSYS utiliza una superficie de fluencia de von Mises. Las propiedades utilizadas son:

- Módulo de elasticidad (E):  $2 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Relación de Poisson ( $\nu$ ): 0.3
- Esfuerzo fluencia ( $f_y$ ):  $4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Módulo tangente:  $29277 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

### 3.6.1.2 Acero de presfuerzo

Se consideraron tres grupos, el primero de ellos es el torón inferior con un área de  $0.99 \text{ cm}^2$ , el segundo corresponde a un segmento del torón superior que queda expuesto con un área de  $0.495 \text{ cm}^2$  y, finalmente, el tercero es el complemento del torón superior que se encuentra embebido en el concreto con un área de  $0.495 \text{ cm}^2$ . Los tres grupos se ilustran en la figura 3.9.

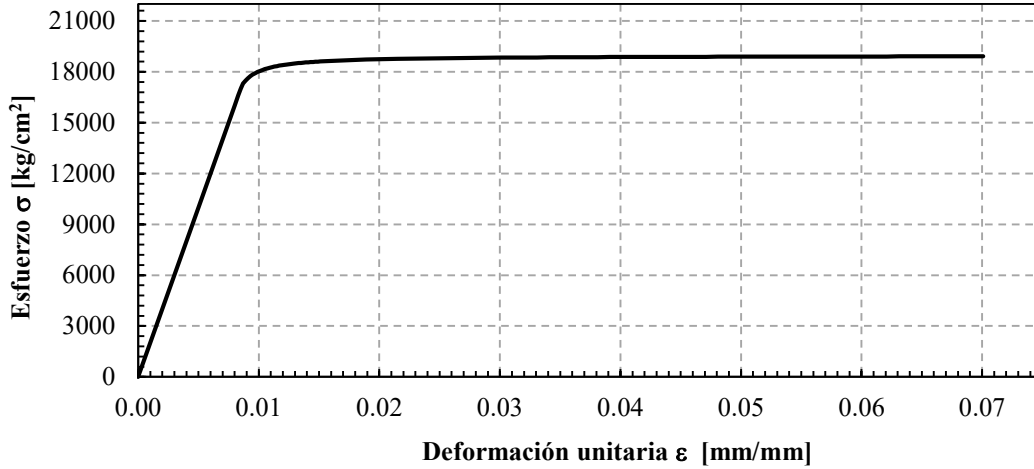
- Módulo de elasticidad (E):  $1.96 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Relación de Poisson ( $\nu$ ) : 0.3



**Figura 3.9 Identificación del acero de presfuerzo**

Se consideró que el acero de presfuerzo es un material multilíneal isotrópico siguiendo los criterios de fluencia von Mises, su modelación se llevó a cabo utilizando la curva esfuerzo-deformación multilíneal generada con la ecuación 3.1 (Wolanski 2004), que se ilustra en la figura 3.10.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{ps} &\leq 0.008 & f_{ps} &= 28000 \varepsilon_{ps} \text{ (ksi)} \\
 \varepsilon_{ps} &> 0.008 & f_{ps} &= \left[ 268 - \frac{0.075}{\varepsilon_{ps} - 0.0065} \right] < 0.98 f_{pu} \text{ (ksi)}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$



**Figura 3.10 Curva esfuerzo-deformación (Wolanski 2004)**

### 3.6.1.3 Concreto

Es necesario proveer al elemento SOLID65 de propiedades del material lineal y multilineal isotrópico. El material isotrópico multilineal utiliza el criterio de falla von Mises junto con el modelo Willam y Warnke (1974) para definir la falla del concreto. Las propiedades del concreto corresponden a la etapa de transferencia, cuya resistencia a la compresión es  $f'_{ci}=280 \text{ kg/cm}^2$  (apéndice F).

- Densidad ( $\gamma_c$ ):  $2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Relación de Poisson ( $\nu$ ) : 0.2
- Módulo de elasticidad ( $E_c$ ):  $234,265 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

La relación esfuerzo-deformación a la compresión uniaxial para el modelo del concreto, fue obtenida utilizando las ecuaciones para calcular la curva de esfuerzo-deformación multilineal isotrópica para el concreto (MacGregor 1992). Esta curva contribuye a la convergencia del algoritmo de la solución no lineal. Las ecuaciones para obtenerla son:

$$f = \frac{E_c \cdot \varepsilon}{1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon^o} \right)^2} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon^o = \frac{2 \cdot f'_c}{E_c} \quad (3.3)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (3.4)$$

donde

$f$     esfuerzo para cualquier deformación unitaria  $\varepsilon$

$\varepsilon^o$     deformación unitaria en la resistencia última a la compresión,  $f'_c$

Asimismo, como se menciona en Godínez *et al.* (2012) es necesario indicar en ANSYS los siguientes parámetros:

1. Coeficiente de transferencia de cortante para grietas abiertas ( $\beta_t$ )
2. Coeficiente de transferencia de cortante para grietas cerradas ( $\beta_c$ )
4. Resistencia uniaxial a tensión (módulo de ruptura,  $f_r$ )
3. Resistencia uniaxial a compresión ( $f'_c$ )

Para los coeficientes  $\beta_t$  y  $\beta_c$ , se consideraron las mismas magnitudes que emplearon JinWoo (2012), Mohanamurthy (2013) y Haque (2014) en sus modelos de elementos presforzados,  $\beta_t = 0.3$  y  $\beta_c = 1$ . El factor  $f_r$  se calculó con la ecuación 3.5 contenida en las NTCC (2004), que corresponde al módulo de ruptura:

$$f_r = 1.7\sqrt{f'_c}; \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (3.5)$$

El factor  $f'_c$  se tomó como -1 para poder anular la verificación de aplastamiento del elemento de concreto como sugieren varios investigadores (Wolanski 2004). En sus trabajos JinWoo (2012), Mohanamurthy (2013) y Haque (H 2014) consideraron la misma magnitud (-1).

#### 3.6.1.4 Placas de acero

Estos elementos se emplearon en las zonas de apoyo y de carga, así como en las placas de anclaje del torón. En su modelación se consideró un comportamiento elástico lineal con la finalidad de disminuir la concentración de esfuerzos (Godínez *et al.* 2012).

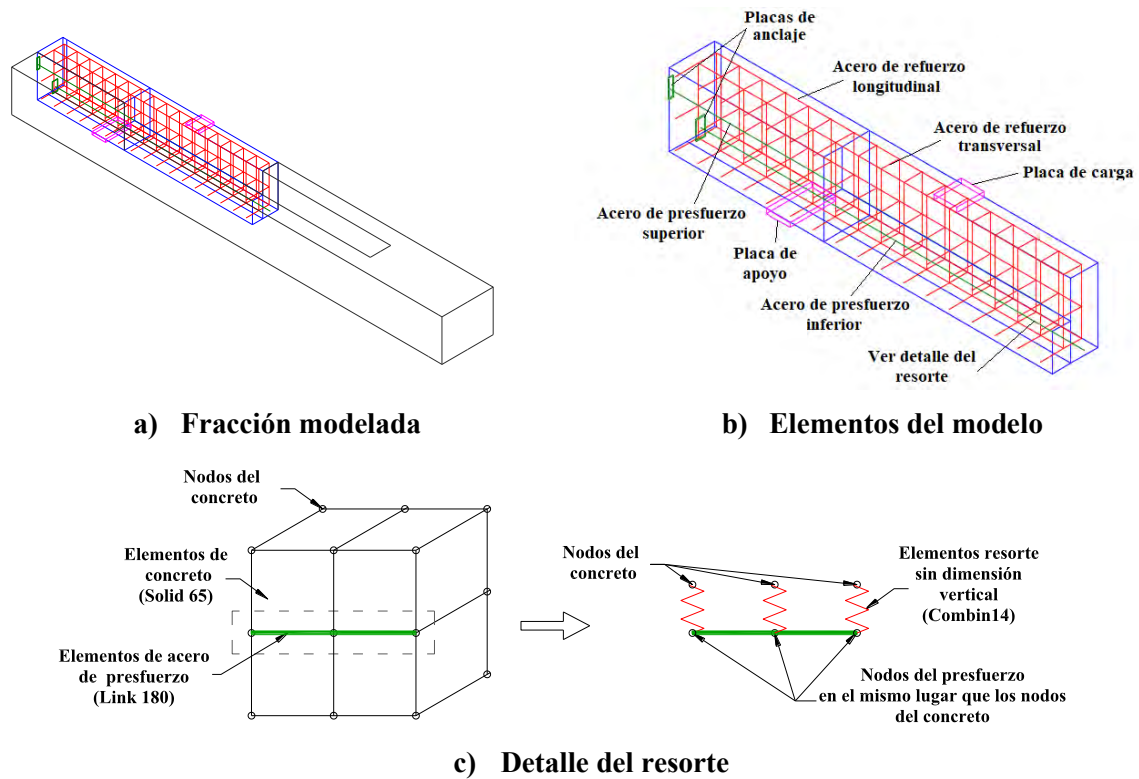
- Relación de Poisson ( $\nu$ ) : 0.3
- Módulo de elasticidad (E):  $2.1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$

#### 3.6.1.5 Resortes

Estos elementos se usaron para modelar la no adherencia entre los torones y el concreto. Se permitió que estos resortes se comportaran como resorte-amortiguador longitudinal con un grado de libertad vertical, UZ. La rigidez del resorte se fijó a  $100000 \text{ N/mm} \approx 101940 \text{ kg/cm}$ , magnitud similar a la utilizada por Jnaid y Aboutaha (2015). Los coeficientes de amortiguamiento y la fuerza inicial se consideraron igual a cero.

### 3.6.2 CRITERIOS DE MODELADO

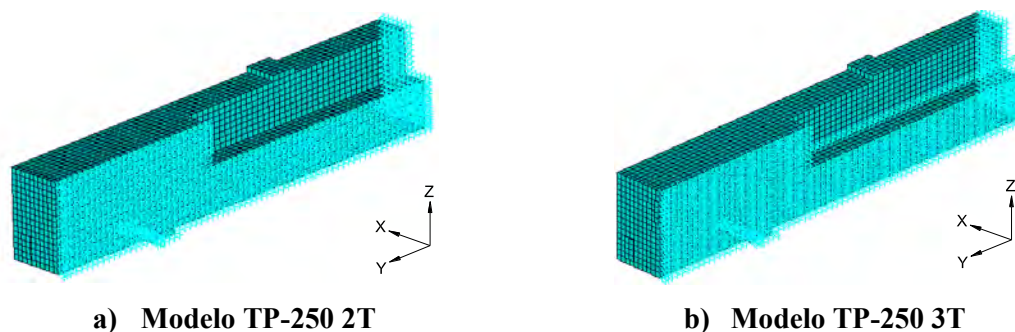
Con la finalidad de optimizar recursos computacionales y aprovechando la simetría de las travesas, sólo se modeló una cuarta parte del elemento como se ilustra en la figura 3.11a. El modelo se detalló considerando el acero de refuerzo ordinario tanto longitudinal como transversal, el acero de presfuerzo superior e inferior, los resortes, el concreto, las placas de anclaje, la placa de carga y la placa de apoyo como se ilustra en la figura 3.11b. La placa de carga se modeló aunque finalmente no se le aplicó carga dado que, como ya se comentó, el análisis se hizo únicamente con el peso propio.



**Figura 3.11 Elementos que integran el modelo de elemento finito**

### 3.6.3 CONDICIONES DE APOYO Y DE FRONTERA

Debido a que se modeló sólo una cuarta parte de la trabe fue necesario restringir en las dos direcciones donde existe la continuidad, es decir, transversalmente ( $U_X=0$ ) y longitudinalmente ( $U_Y=0$ ). En lo que respecta al apoyo, se restringió en dos direcciones, de tal forma, de simular el comportamiento de un rodillo ( $U_X=0$  y  $U_Z=0$ ).



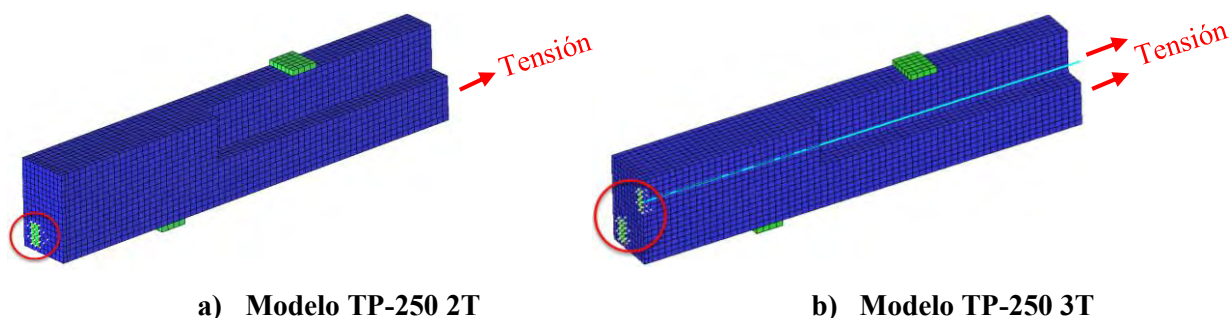
**Figura 3.12 Condiciones de apoyo y de frontera**

### 3.6.4 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Debido a que en los análisis sólo se consideró el peso propio y el efecto del presfuerzo, y a que el espécimen es muy rígido, no se logró incursionar en el intervalo inelástico. Por lo tanto, los resultados del análisis lineal y no lineal fueron prácticamente iguales. La mayoría de los resultados que aquí se presentan corresponden al análisis no lineal.

#### 3.6.4.1 Análisis lineal

Haciendo uso del esfuerzo principal en tensión y comparándolo con el esfuerzo de ruptura calculado con la ecuación 3.5 ( $f_r=28.44 \text{ kg/cm}^2$ ), se identificaron las zonas susceptibles a presentar agrietamientos. Como se observa en la figura 3.13 estas zonas corresponden a los anclajes del presfuerzo en ambos modelos.

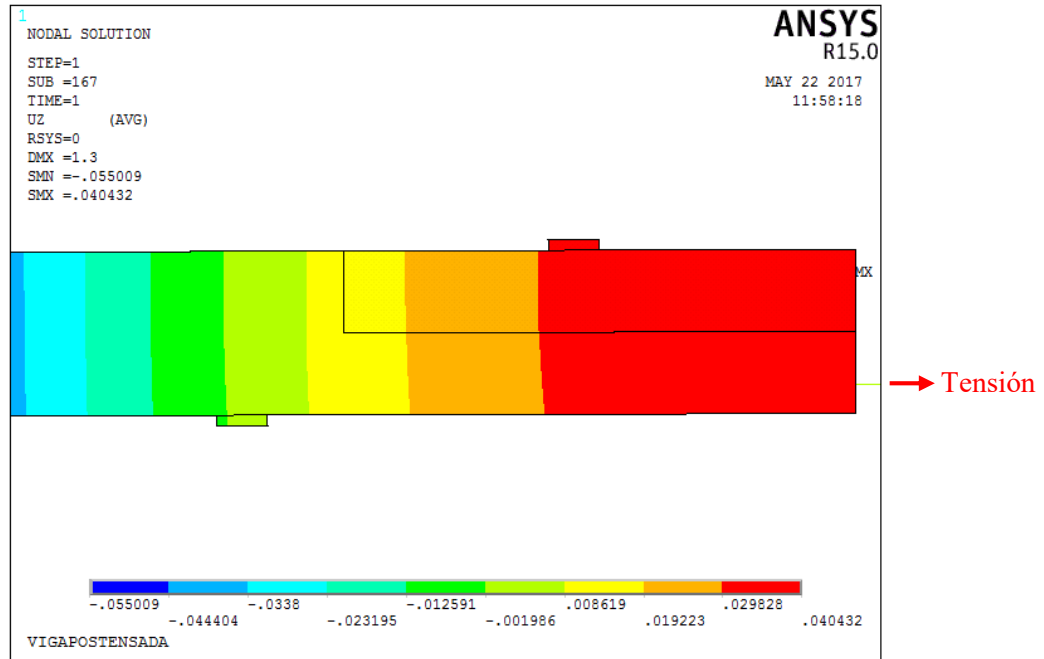


**Figura 3.13 Zonas susceptibles a agrietarse**

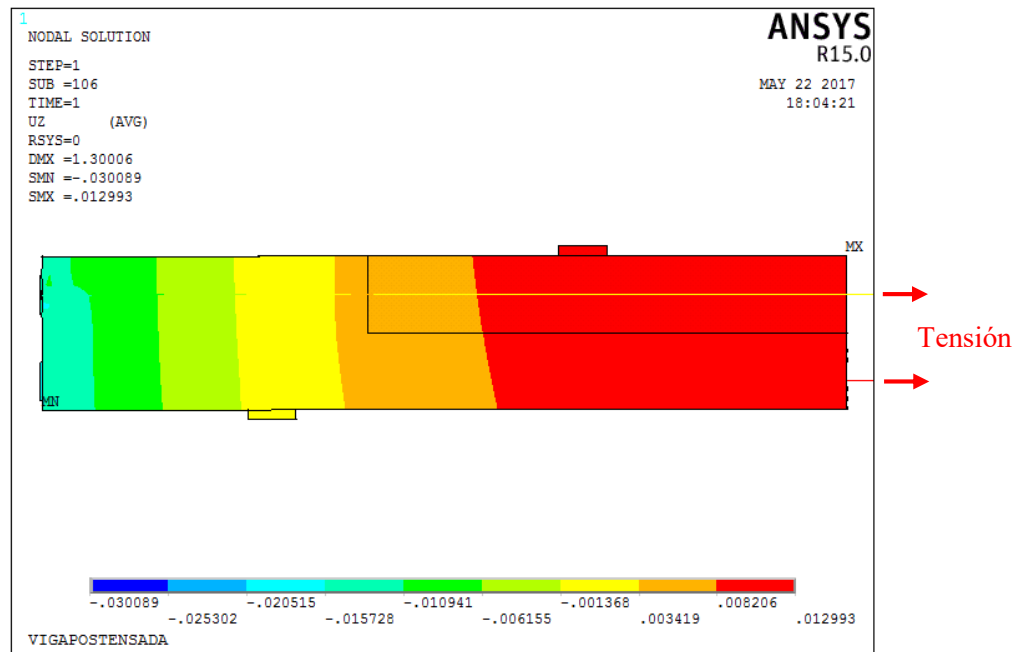
#### 3.6.4.2 Análisis no lineal

##### 3.6.4.2.1 Deflexiones

Las magnitudes máximas de deflexión se presentaron al centro del claro como se aprecia en la figura 3.14. Los resultados se presentan en la tabla 3.6, en donde además se comparan con los obtenidos en el programa CONCISE.



**a) Modelo TP-250 2T**



**b) Modelo TP-250 3T**

**Figura 3.14 Deflexiones**

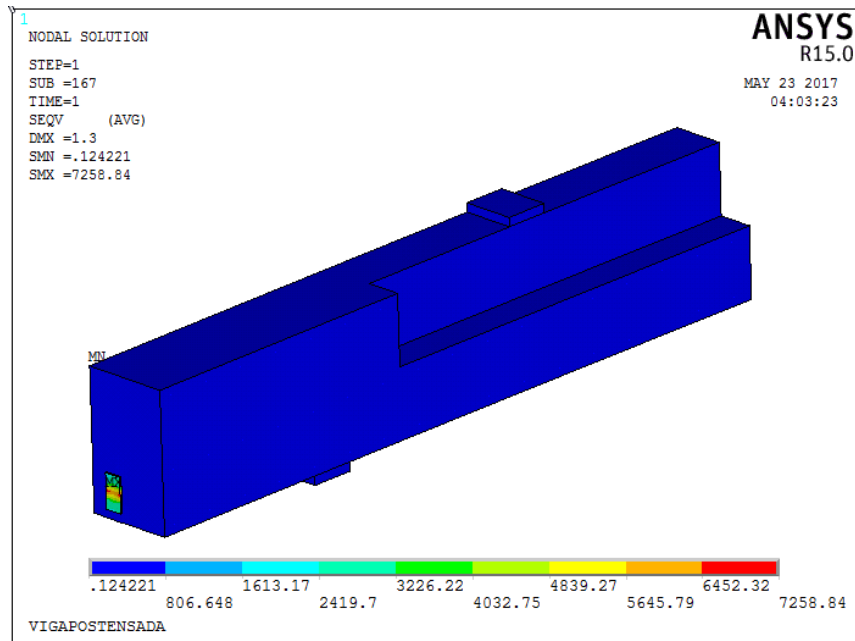
**Tabla 3.6 Resumen de deflexiones**

Modelo	Deflexiones a 0.5L [mm]	
	ANSYS	CONCISE
TP-250-2T	+0.40	+0.45
TP-250-3T	+0.13	+0.15

De acuerdo con la tabla 3.6, las deflexiones obtenidas en CONCISE son mayores en aproximadamente 15% con respecto a los resultados obtenidos en ANSYS.

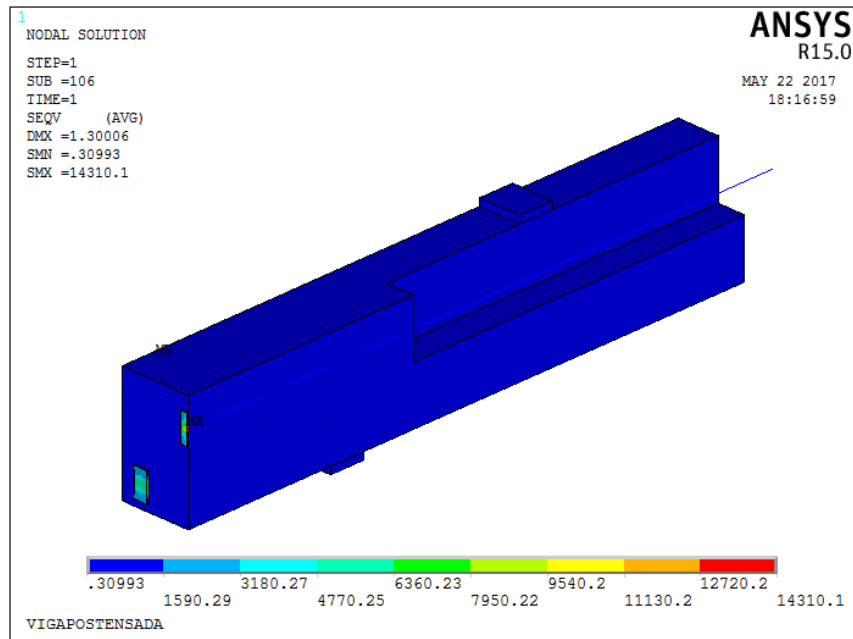
#### 3.6.4.2.2 Esfuerzos Von Mises

Se revisaron los esfuerzos con el criterio de falla von Mises. Como se observa en la figura 3.15, existe concentración de esfuerzos en las placas de anclaje.



**a) Modelo TP-250 2T**





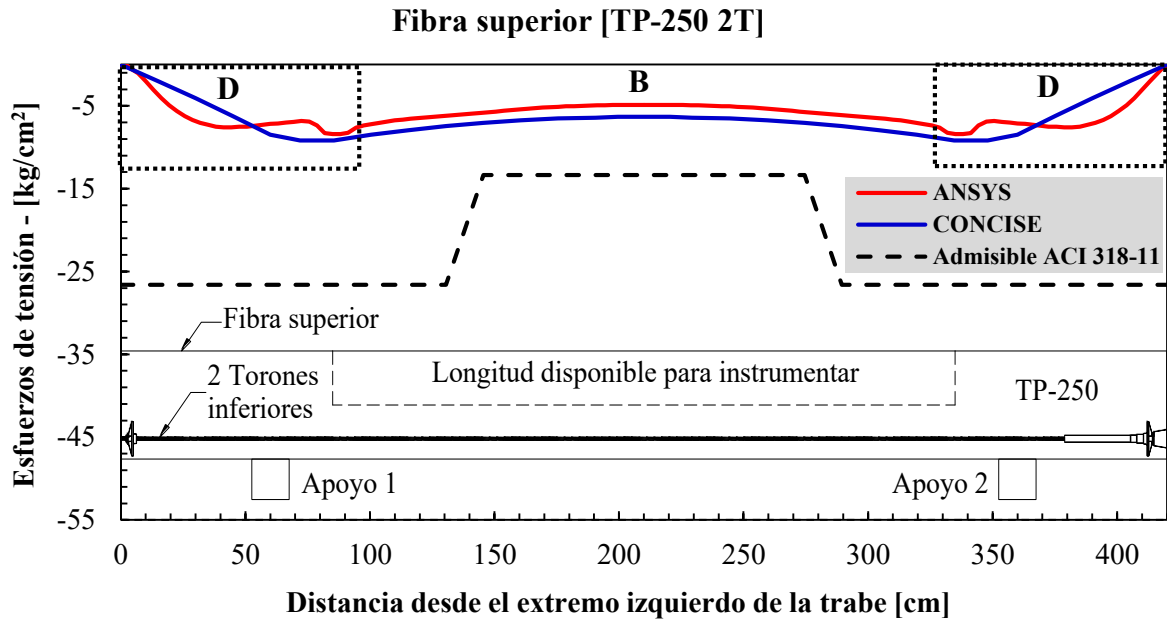
**b) Modelo TP-250 3T**

**Figura 3.15 Esfuerzos Von Mises**

Considerando que la evaluación de los esfuerzos de tensión y compresión en el concreto fue uno de los principales factores que motivó a llevar a cabo el modelo de elemento finito, se hizo una evaluación detallada de su magnitud a lo largo del eje longitudinal de los modelos y, nuevamente los resultados se compararon con los obtenidos en CONCISE.

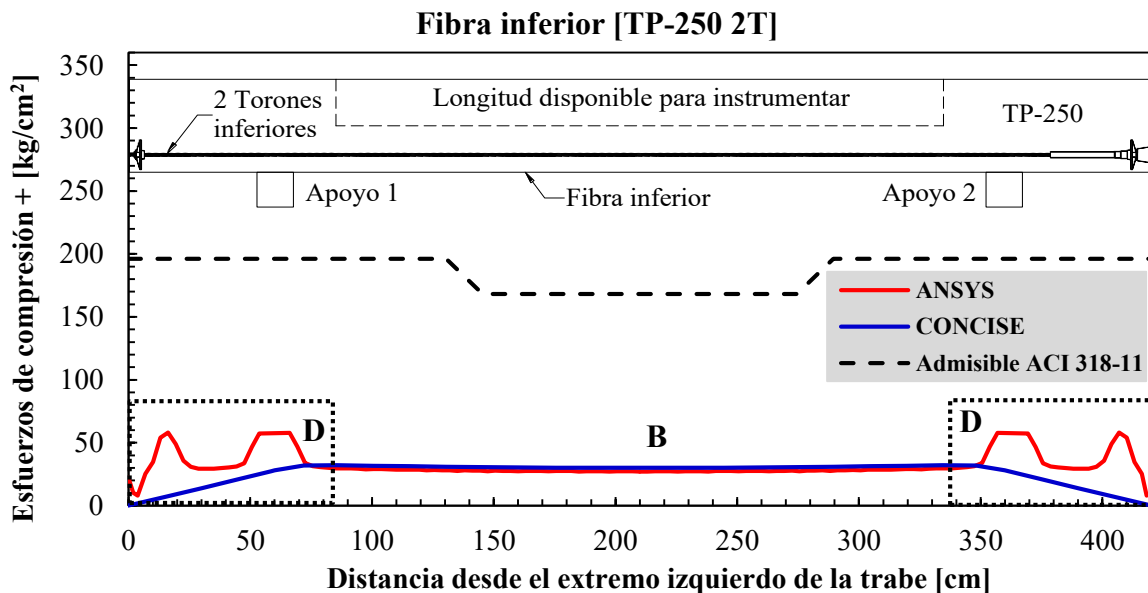
Para el caso del modelo con sólo dos torones inferiores (TP-250 2T), en la fibra superior se tienen esfuerzos de tensión (figura 3.16). Se observa que la estimación de los esfuerzos entre ANSYS y CONCISE sólo difiere un poco en los extremos del modelo, siendo ligeramente mayores los obtenidos en ANSYS. En ambos casos, los esfuerzos estimados son inferiores a los admisibles por el ACI 318-11.

Además, en la figura 3.16 se indican las regiones “D” definidas por el modelo de elemento finito, donde la distribución de esfuerzos es significativamente no lineal (Schlaich *et al.* 1987). Estas regiones se definen a partir del cambio de geometría en la fibra superior debido al vacío de concreto. También, se identifican las regiones “B” donde se puede aplicar la suposición de que las secciones planas permanecen planas de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli. Es de resaltar, que dicha teoría es la base de la formulación que utiliza CONCISE para realizar el diseño.



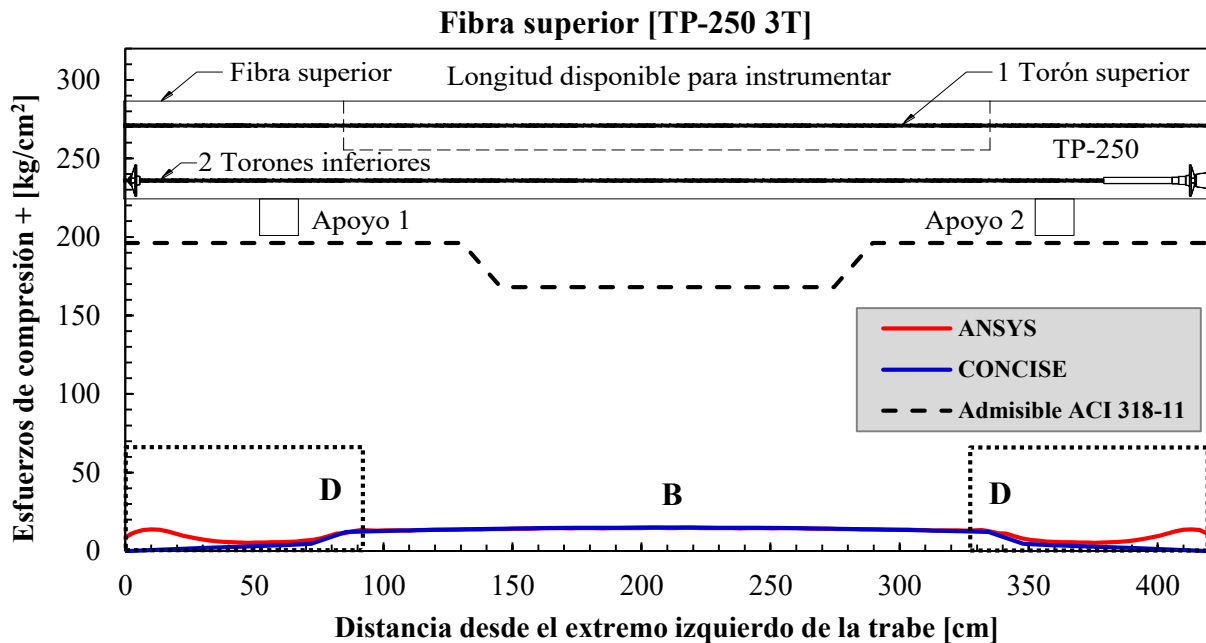
**Figura 3.16 Esfuerzos en fibra superior modelo TP-250 2T**

Por otro lado, en la fibra inferior se tienen esfuerzos de compresión (figura 3.17). La estimación de los dos programas es muy similar excepto en los extremos, ya que CONCISE considera los torones adheridos y calcula la longitud a la cual éstos han alcanzado el cien por ciento de la adherencia y, en el caso del modelo de elemento finito elaborado en ANSYS, el efecto del presfuerzo existe hasta el punto de anclaje. El primer pico se atribuye a que se concentran los esfuerzos cerca de la placa de anclaje y el segundo a las restricciones consideradas en el modelo por las condiciones de apoyo, ambos definen las regiones D como se ilustra en la figura 3.17.

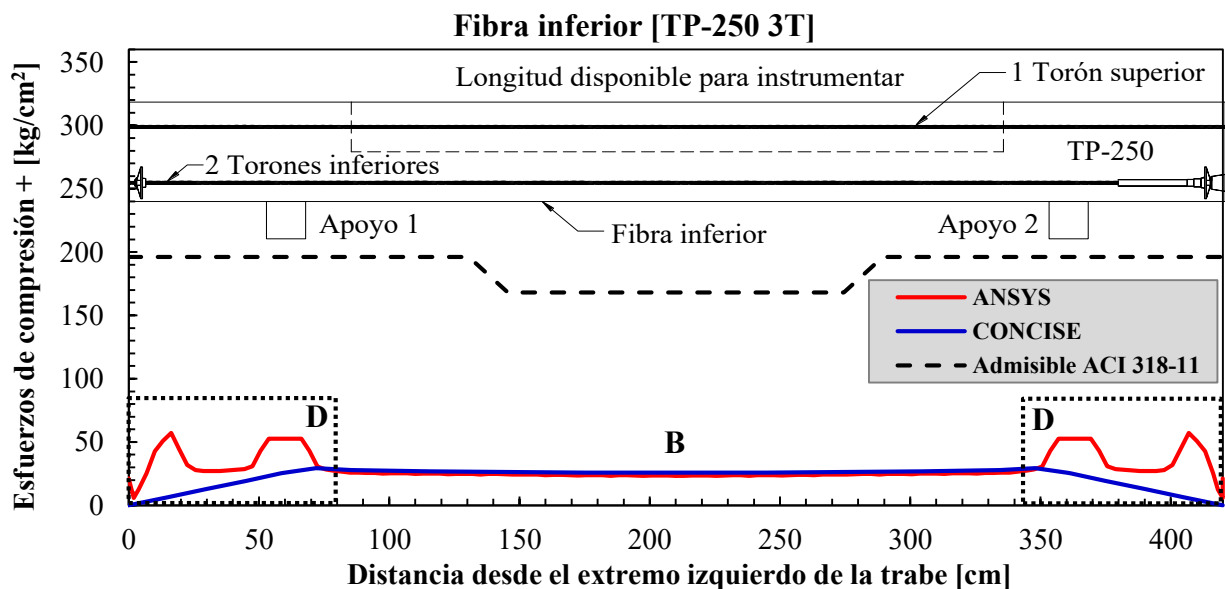


**Figura 3.17 Esfuerzos en fibra inferior modelo TP-250 2T**

El añadir el torón superior, provocó que tanto la fibra superior como inferior se encontraran en compresión como se muestra en las figuras 3.18 y 3.19, respectivamente. En el caso de la fibra superior, ambos programas coinciden en su estimación al centro del claro, y en los extremos son ligeramente mayores los esfuerzos obtenidos en el modelo de ANSYS. Por otro lado, en la fibra inferior las dos estimaciones presentan mucha similitud variando nuevamente en los extremos por las mismas razones que se discutieron en el modelo TP-250 2T.



**Figura 3.18 Esfuerzos en fibra superior modelo TP-250 3T**

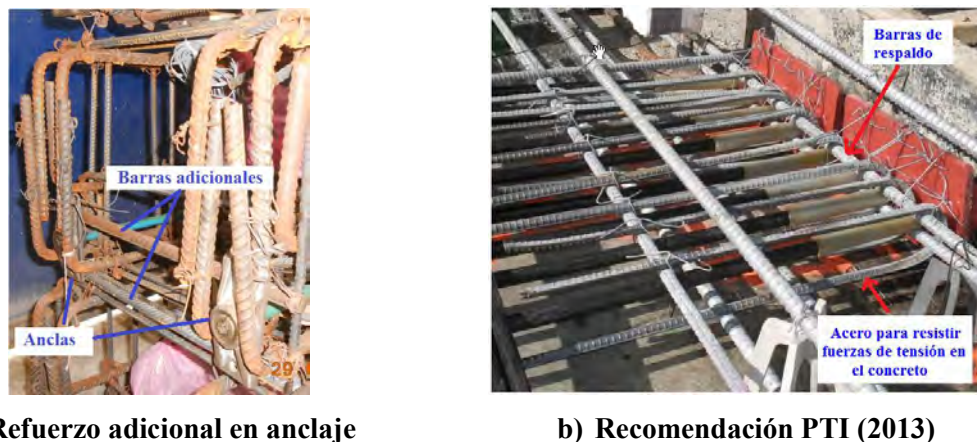


**Figura 3.19 Esfuerzos en fibra inferior modelo TP-250 3T**

Las magnitudes de deflexión y esfuerzos que se obtuvieron del análisis no lineal en el modelo de elemento finito, muestran bastante similitud con respecto a las obtenidas en el programa CONCISE en los dos escenarios evaluados (dos y tres torones). En ambos casos, se obtuvieron resultados conservadores con respecto a los esfuerzos admisibles por el ACI 318 (2011).

A pesar de que el modelo de elemento finito corresponde al modelo de ensaye TP-250, dado la magnitud de sus resultados y tomando en cuenta que los tres especímenes son muy rígidos, se consideró representativo para los tres modelos de ensaye. Esto significó que los armados propuestos para dichos modelos resultaron ser apropiados evitando la concentración de esfuerzos a lo largo de su longitud.

Finalmente, por simplicidad las placas de anclaje del presfuerzo se modelaron a tope en la cara lateral exterior del espécimen, aunque realmente se colocaron embebidas en el concreto (figura 3.20a). En esta zona, los análisis (lineal y no lineal) indicaron esfuerzos de tensión de magnitud considerable. Por ello, con la finalidad de resistir el esfuerzo de ruptura y evitar el agrietamiento en el concreto se agregaron barras de refuerzo como se observa en la figura 3.20a, similar a lo recomendado por el PTI (2013) (figura 3.20b).



**Figura 3.20 Refuerzo en anclaje**

### **3.7 CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS DE ENSAYE**

La construcción de los especímenes se realizó en el laboratorio de estructuras y el patio de maniobras de la UAM-A. En su construcción, participaron alumnos de tesis de licenciatura, taller y servicio social de la carrera de ingeniería civil.

#### **3.7.1 Acero de refuerzo y cimbra**

Debido a la irregularidad de las secciones transversales y al arreglo del acero de refuerzo longitudinal, fue necesario elaborar distintos tipos de estribos siguiendo los lineamientos de detallado de refuerzo establecidos en las NTCC (2004) (figura 3.21a).

En el habilitado de la cimbra se utilizaron polines de 3" x 3" x 8 1/4' y 2" x 2" x 8 1/4', así como triplay de 1/2" de espesor. Con la finalidad de realizar un habilitado de calidad, la mayoría de las uniones se realizaron utilizando tornillos, y para su fijación final se emplearon espárragos de 1/2" (figura 3.21b).



**a) Habilitado del acero de refuerzo**

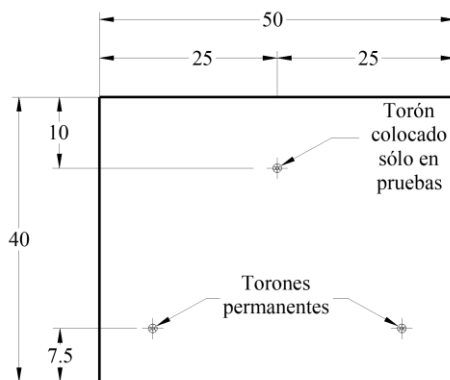


**b) Habilitado de cimbra**

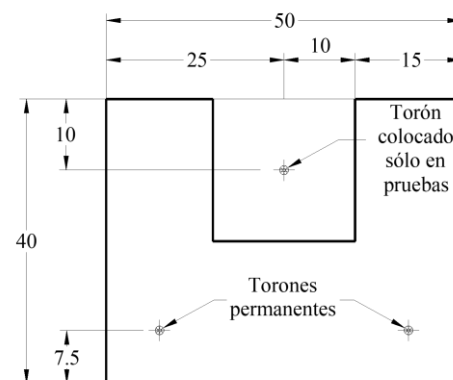
**Figura 3.21 Actividades iniciales en la construcción de los modelos de ensaye**

### 3.7.2 Acero de presfuerzo

En la etapa constructiva sólo se colocaron los dos torones inferiores, que serían permanentes, con un recubrimiento de 7.5 cm (figura 3.22). En la posición del torón superior sólo se dejó la preparación colocando un ducto de PVC de 19.05 mm de diámetro para que distintas muestras de torón fuesen colocadas durante la etapa de pruebas (figura 3.29b). En ambas secciones, los torones se colocaron sin curvaturas, es decir, totalmente rectos a lo largo de su longitud (figura 3.25b).



**a) Corte A-A'**

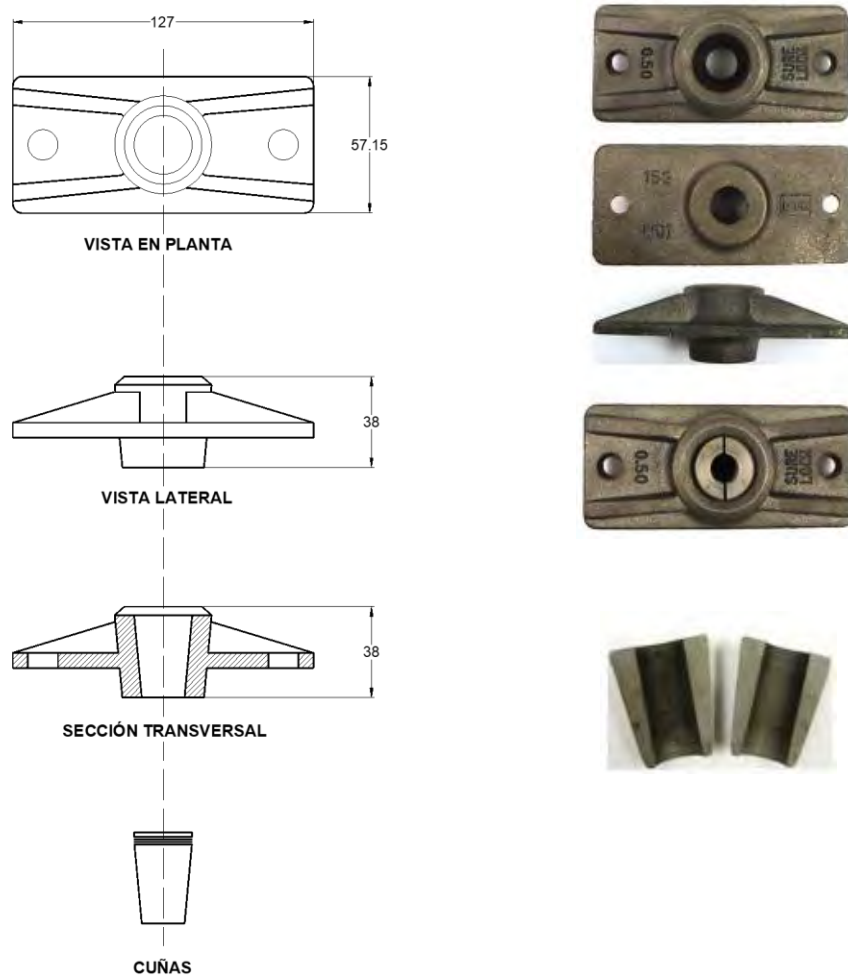


**b) Corte B-B'**

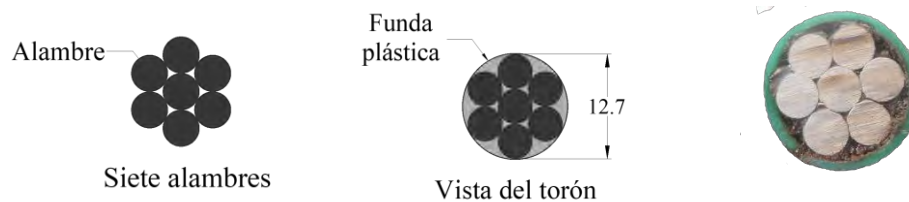
**Figura 3.22 Ubicación del acero de presfuerzo**

El torón utilizado es no adherente (recubierto de grasa y con una funda de polietileno de alta densidad, figura 3.23b) compuesto por un conjunto de siete alambres, seis de ellos colocados en forma helicoidal sobre un alambre central. Las placas de anclaje y las cuñas fueron las apropiadas

de acuerdo al diámetro del torón. En la figura 3.23 se detallan las dimensiones de los accesorios que se utilizaron para el sistema de postensado.



**a) Placa de anclaje y cuñas**



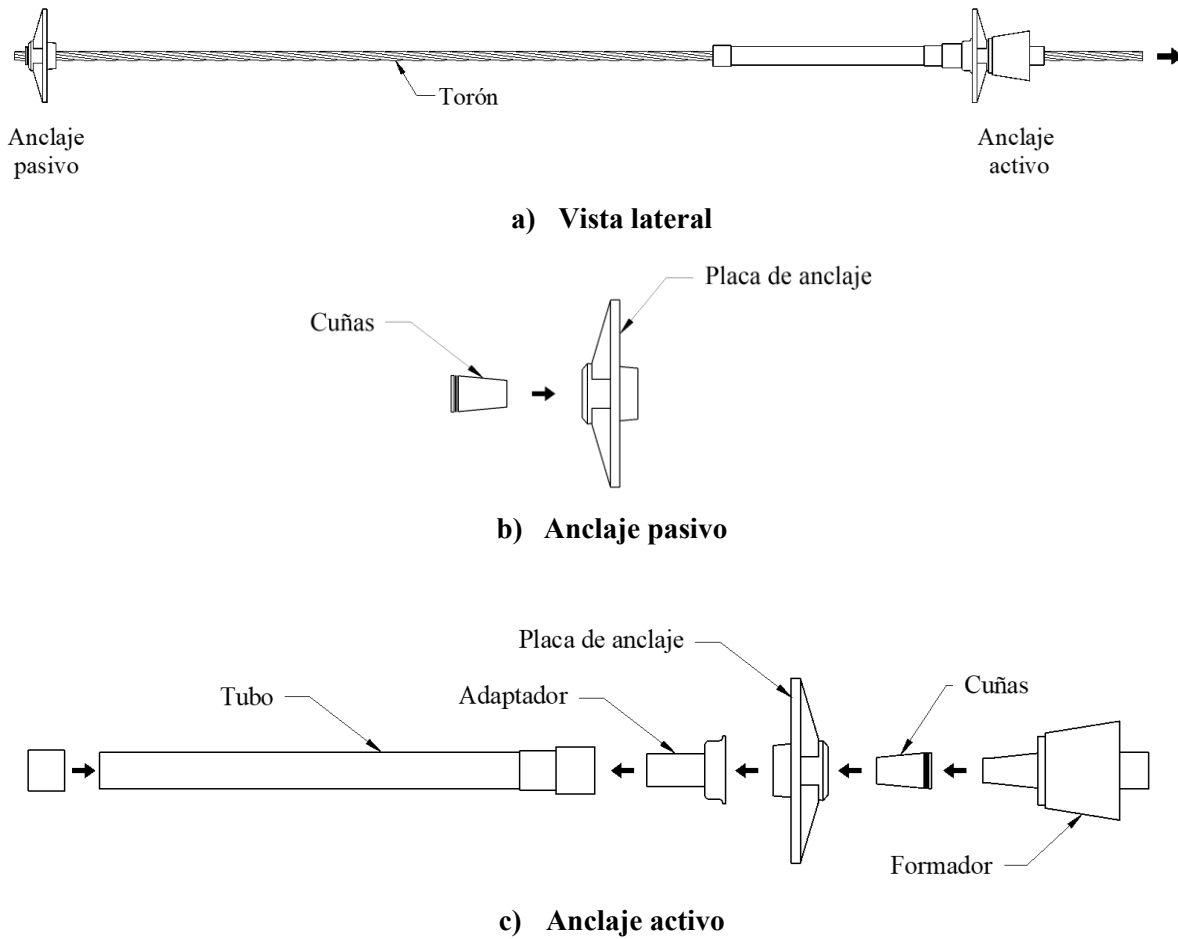
**b) Torón de siete alambres**

**Figura 3.23 Geometría de placa de anclaje, cuñas y torón (dimensiones en mm)**

Asimismo, se emplearon tipos de anclajes comúnmente utilizados en la práctica mexicana para la construcción de elementos postensados. Los elementos del anclaje activo van situados en el extremo en el que se aplica la fuerza de tensado y los del anclaje pasivo quedan embebidos en el



concreto sin permitir la acción del tensado a través de ellos. Ambos anclajes, se ilustran en la figura 3.24.



**Figura 3.24 Tipos de anclaje**



**a) Colocación de cuñas y anclas en anclaje pasivo**



**b) Colocación del presfuerzo**

**Figura 3.25 Colocación de anclas, cuñas y acero de presfuerzo**

Los trabajos iniciaron con el acuíñamiento en el anclaje pasivo (figura 3.25a). Para ello, se colocaron las cuñas ejerciendo presión mediante un cilindro hidráulico de la marca Enerpac modelo RCH202 y una bomba manual de presión de la misma marca, modelo P392. Los anclajes pasivo y activo ya colocados en un modelo se muestran en las figuras 3.26a y 3.26b, respectivamente.



a) Anclaje pasivo

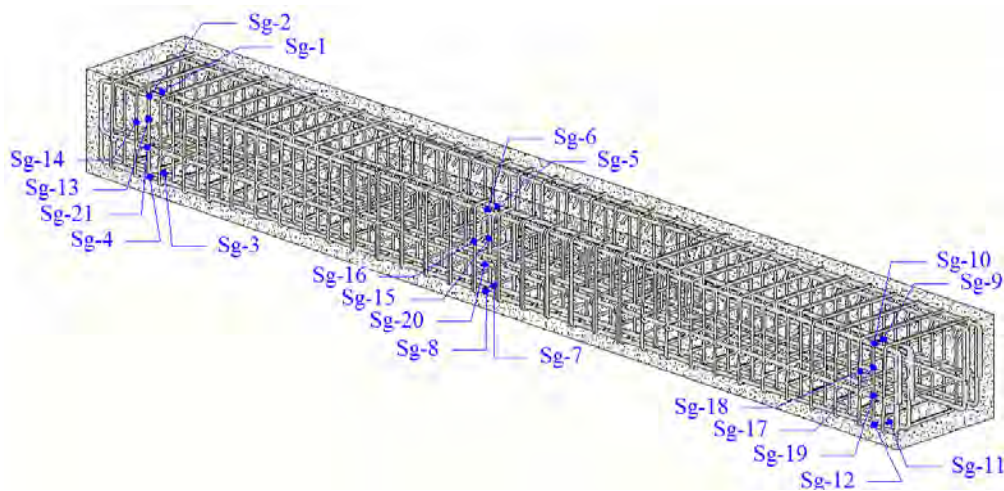


b) Anclaje activo

**Figura 3.26 Anclajes colocados**

### 3.7.3 Instrumentación

Consistió en instrumentación interna que se llevó a cabo colocando *strain gages* en puntos estratégicos sobre el acero de refuerzo ordinario con la finalidad de medir la magnitud de las deformaciones unitarias longitudinales y transversales generadas durante las pruebas de tensado y destensado de las muestras de torón. Dichas deformaciones se compararon con la deformación unitaria de fluencia del acero de refuerzo obtenida experimentalmente. Aprovechando la simetría de los especímenes, en cada uno se instalaron 21 *strain gages* como se ilustra en la figura 3.27.



**Figura 3.27 Ubicación de *strain gages* (Sg) en el acero de refuerzo ordinario**



Los deformímetros empleados son modelo FLA-3-11-10LT de la marca TML. Sus principales características son:

- Longitud: 3 mm
- Ancho: 1.7 mm
- Factor:  $2.12 \pm 1\%$
- Resistencia:  $120 \pm 0.5 \Omega$
- Sensibilidad transversal: 0.3%

Para su colocación se siguió el siguiente procedimiento:

- a) Se eliminó el corrugado del acero de refuerzo y se pulió la superficie hasta quedar completamente lisa y totalmente limpia de impurezas
- b) Se llevó a cabo un pulido químico sobre la superficie utilizando ácido y lija fina (del No. 600)
- c) Se aplicó una base sobre la superficie y se limpió perfectamente
- d) Se aplicó catalizador sobre el *strain gage*
- e) Se colocó pegamento de cianocrilato sobre la superficie
- f) Se pegó el *strain gage*
- g) Se colocó sobre el *strain gage* un revestimiento de poliuretano (barniz).

Posteriormente, como procedimiento de aislamiento:

- h) Se colocó una capa de teflón adhesivo
- i) Se colocó una capa de neopreno
- j) Se colocó una capa de caucho

Finalmente, para proteger la instalación de los agentes ambientales y posibles impactos:

- k) Se impregnó pegamento de contacto
- l) Se colocó aluminio adhesivo sobre toda la superficie de instalación.

Los deformímetros se probaron después de su colocación por medio de un multímetro para verificar su funcionamiento. Una vez instalados y verificados, se identificaron de acorde a la nomenclatura indicada la figura 3.27 y, posteriormente, sus cables fueron sujetos al acero de refuerzo y guiados cuidadosamente hacia un extremo para facilitar los trabajos de ensaye.

En la figura 3.28 se resume el procedimiento que se siguió en la colocación de los *strain gages*.



**a) Colocación de *strain gage***



**b) Colocación de neopreno y caucho**



**c) Protección final**



**d) Sujeción de cables**

**Figura 3.28 Procedimiento de colocación de *strain gages***

### **3.7.4 Colado**

El colado se llevó a cabo empleando concreto premezclado con una resistencia,  $f'_c$  de 350 kg/cm<sup>2</sup>, revenimiento de 12 cm y tamaño máximo de agregado de 20 mm. En las figuras 3.29 y 3.30 se muestran las etapas que se realizaron hasta el almacenado de los especímenes para realizar el postensado.



**a) Colocación de armados dentro de la cimbra**



**b) Alineación y nivelación de la cimbra**

**Figura 3.29 Actividades previas**



**a) Colocación y vibrado del concreto**



**b) Obtención de cilindros y vigas de concreto**



**c) Acabado pulido final**



**d) Colocación de arena húmeda para el curado del concreto**



**e) Descimbrado**



**f) Almacenamiento de especímenes para el postensado de torones**

**Figura 3.30 Procedimiento de colado y descimbrado**

Durante el colado se obtuvieron cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de longitud, y vigas de 15x15x60 cm que posteriormente fueron ensayados a compresión y flexión, respectivamente

(apéndice E). Asimismo, para los tipos de acero se realizaron pruebas de tensión (capítulo 4 y apéndice E).

### **3.8 COMENTARIOS**

Antes de realizar el postensado y las pruebas de medición de deformaciones en los modelos de ensaye, se procedió a realizar las pruebas de tensión de 25 especímenes de presfuerzo en la máquina universal de pruebas. Estas actividades se describen en el capítulo 4.

### **3.9 REFERENCIAS**

1. Abdulamier, J S, A H Aziz y H S Al-aasam (2013), “Non-Linear Behavior of Unbonded Post-Tensioned one-way Concrete Slab Panel”, Journal of Environmental Studies [JES], Vol. 10, pp. 39-45.
2. ACI 318-11 (2011), “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”, American Concrete Institute.
3. ANSYS (2013), “ANSYS User’s Manual versión 15.0, ANSYS, Inc.”, Canonsburg, Pensilvania, E.U.A.
4. Concise Beam (2016), “Concise Beam User’s Manual versión 4.59x 2016”, Black Mint Software, Inc.675 Cooper St., Ottawa ON, K1R 5J3, CANADÁ.
5. Godínez, E A, A Tena, y G Juárez (2012), “Análisis numérico de trabes acarteladas de concreto reforzado”. Memorias, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.
6. Haque, F (2014), “Enhancing effectiveness of aashto type prestressed concrete bridge girder Through fiber reinforced Polymer strengthening”, Master's Thesis, University of Texas at Arlington.
7. Huang Yu, T H K Kang, C Ramseyer y C Rha (2009), “Background to Multi-Scale Modelling of Unbonded Post-Tensioned Concrete Structures”, Int. J.Theoretical and Applied Mutiscale Mechanics [J], pp. 219-238.
8. JinWoo, A (2012), “Estimation of Beam Prestress”, Master's Thesis, University of Texas at Austin.
9. Jnaid, F y R Aboutaha (2015), “Nonlinear Finite Element Modeling of Unbonded Steel Reinforced Concrete Beams”, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, Vol. 9, No. 3.

10. MacGregor, J G (1992), “Reinforced Concrete Mechanics and Design”, 2nd Edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
11. Mohanamurthy, M (2013), “Finite element modeling of prestressed girder strengthening using fiber reinforced polymer and codal comparison”, Master's Thesis, University of Texas at Arlington.
12. NTCC (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre, México.
13. PTI TAB.3-13 (2013), “Post-Tensioning Terminology (PTT)”, Post-Tensioning Institute.
14. William, K J y E P Warnke (1974), “Constitutive Model for the Triaxial Constitutive Behavior of Concrete”, IABSE Seminar on Concrete Subjected to Triaxial Stresses, Paper III-1, Instituto Sperimentali Modelli e Struture, Bergamp, Italy.
15. Wolanski, A J (2004), “Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis”, Master's Thesis, Marquette University, Milwaukee, Wisconsin, USA.



## CAPÍTULO 4: PRUEBAS DE Tensión DE TORONES DE PRESFUERZO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los procedimientos que se siguieron para llevar a cabo pruebas de tensión en torones de presfuerzo. Las primeras actividades consistieron en determinar el método de sujeción más apropiado en los extremos de las muestras de torón de tal forma que se eviten deslizamientos en las mordazas de la máquina universal y se logre la ruptura de los torones al alcanzar su resistencia a tensión. Para ello, inicialmente se realizaron pruebas preliminares utilizando distintos métodos hasta encontrar el que proporcionó mejores resultados. Una vez definido el método de sujeción, se realizaron pruebas de tensión de 25 especímenes de presfuerzo.

En cada espécimen de prueba se obtuvieron las deformaciones unitarias a través de cuatro dispositivos de medición: un transductor de desplazamiento lineal (LVDT, por sus siglas en inglés) y tres *strain gages*. La definición de los modelos de *strain gages* que se utilizaron y su distribución en las muestras de torón se hizo a través de pruebas preliminares. En cuanto al transductor, se habilitó un dispositivo para facilitar su fijación con las muestras de torón.

Se obtuvieron cuatro curvas esfuerzo-deformación por cada espécimen (una por cada dispositivo), a partir de éstas, se calcularon: el módulo de elasticidad, la resistencia de ruptura, la resistencia de fluencia, y la elongación. Estas magnitudes se compararon con los requerimientos establecidos en la normatividad aplicable vigente.

Finalmente, para cada dispositivo de medición se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación promedio.

## **4.2 PRUEBAS DE Tensión**

Una etapa importante de esta tesis consistió en probar a tensión hasta llevar a la ruptura 25 especímenes de acero de presfuerzo con las mismas propiedades mecánicas a los utilizados en la construcción de los modelos de ensaye (TP-150, TP-250 y TP-300) descritos en el capítulo 3.

Las características del torón de presfuerzo utilizado son:

- Diámetro: 1.27 cm
- Área nominal: 0.987 cm<sup>2</sup>
- Grado: 270 ksi  $\approx$  19000 kg/cm<sup>2</sup>
- Acero de baja relajación
- Formado por 7 alambres, 1 central y 6 helicoidales

El objetivo principal fue obtener la resistencia de ruptura, resistencia de fluencia, módulo de elasticidad y elongación de cada uno de los especímenes de presfuerzo. Estos resultados se compararon con los mínimos permisibles contenidos en la normatividad nacional e internacional vigente que se menciona en los siguientes párrafos.

### **4.2.1 NORMATIVIDAD**

Debido al tipo de instrumentación que se utilizó, las pruebas se realizaron en tres etapas: 1) especímenes 1 a 15, 2) especímenes 16 a 21 y 3) especímenes 22 a 25. El procedimiento se apegó a lo establecido en las normas:

1. ASTM A370 (2011), “Métodos y definiciones para las pruebas mecánicas de los productos de acero de prueba estándar”, específicamente el anexo A7.
2. ASTM A416/A416M (2016), “Especificación normalizada para torón de acero de siete alambres sin recubrimiento para concreto presforzado”.
3. NMX-B-292-CANACERO (2011), “Torón de siete alambres sin recubrimiento con relevado de esfuerzos para concreto presforzado-especificaciones y métodos de prueba”

Para la ejecución de las pruebas se utilizó la máquina universal Marca Satec-Instron modelo WHV de 400000 lb de capacidad, del Laboratorio de Estructuras de la UAM-A.

### **4.2.2 MONTAJE**

#### **4.2.2.1 Métodos de sujeción**

En la norma ASTM A370 (2011) se indica que es común que se produzcan fallas prematuras en las pruebas de tensión debido a una sujeción incorrecta del torón por las mordazas de la máquina universal. Además, debido a las características físicas inherentes a las máquinas de prueba, no existe una recomendación única o universal de sujeción; sin embargo, la misma norma proporciona

siete distintos métodos. En este trabajo se realizaron diversas pruebas preliminares partiendo de métodos sencillos hasta llegar a métodos más elaborados que permitieron conseguir resultados favorables. En la figura 4.1 se muestran las mordazas de la máquina universal que se utilizaron para realizar las pruebas, las cuales tienen una longitud efectiva de agarre de 17 cm.



**a) Tipo de mordazas utilizadas**



**b) Juego de mordazas superior**



**c) Juego de mordazas inferior**

**Figura 4.1 Mordazas utilizadas en pruebas de tensión**

En las normas ASTM A370 (2011) y NMX-B-292-CANACERO (2011) se indica que los especímenes que fallen dentro o al inicio de las mordazas, y que cumplan con los valores mínimos especificados, satisfacen los requisitos de aceptación. Como se describe a detalle en el apéndice A, se realizaron una serie de pruebas preliminares empleando distintas técnicas de sujeción hasta que se cumplió con la resistencia a la tensión mínima requerida y se logró la falla simultánea de todos los alambres del torón.

Finalmente, la técnica de sujeción empleada en las 25 pruebas consistió en utilizar tubo de aluminio de 19.05 mm de diámetro por 1.65 mm de espesor y 200 mm de longitud, adherido al torón mediante adhesivo epóxico HIT-RE 500-SD de la marca HILTI. Los inicios de esta técnica se dieron en el trabajo realizado por Kent (1985) quien definió al método como el “método del inserto de aluminio”, que consistió en utilizar una mezcla de adhesivo epóxico con arena que fue colocada en la parte interna del inserto de aluminio. Dicho autor, señala que con esta técnica existe una alta probabilidad de obtener rupturas claras.

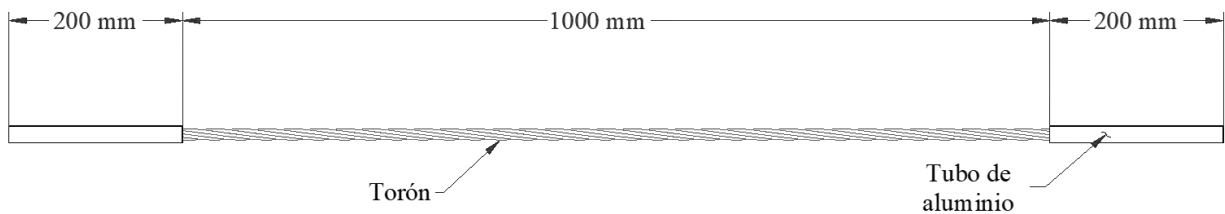


Posteriormente, Hill (2006) y Loflin (2008) aplicaron este método en el desarrollo de sus investigaciones en donde realizaron diversas pruebas de tensión en torones de presfuerzo de distintas propiedades mecánicas.

En todos los especímenes de prueba de este trabajo de investigación, la longitud de sujeción por cada extremo fue de 200 mm y la longitud libre de torón de 1000 mm, como se ilustra en la figura 4.2.



**a) Tubos de aluminio adheridos en extremos de especímenes**



**b) Longitud de sujeción y longitud libre**

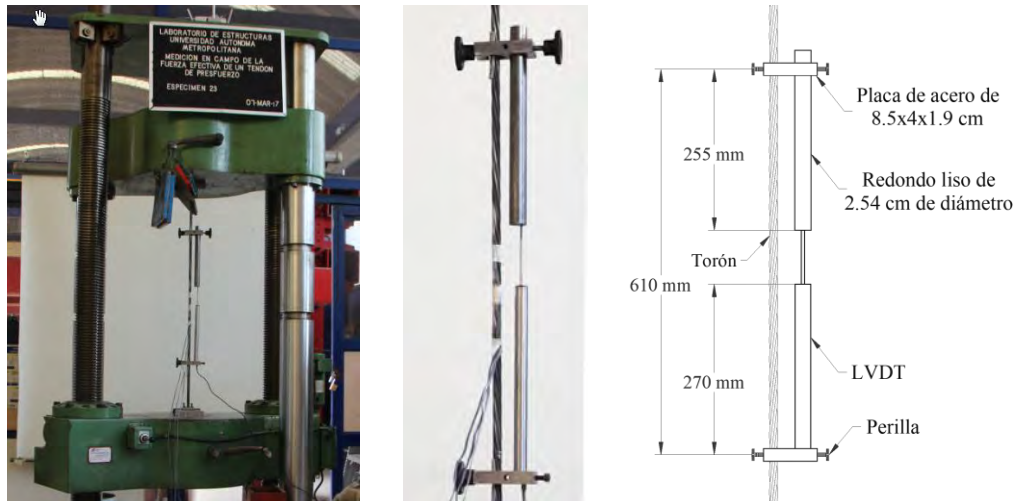
**Figura 4.2 Preparación de sujeción con tubos de aluminio**

### **4.2.3 INSTRUMENTACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

Se utilizaron transductores de desplazamiento para medir las extensiones de los especímenes durante las pruebas de tensión, así como deformímetros electrónicos para medir las deformaciones unitarias. Esto se hizo con el propósito de tener la mayor cantidad de información posible para la definición de las curvas esfuerzo-deformación. Las lecturas de los deformímetros fueron registradas en un equipo de adquisición de datos.

#### **4.2.3.1 Transductor de desplazamiento lineal (LVDT)**

Para medir las extensiones, se elaboró un dispositivo que permitió montar el transductor en los torones y cumplir con la longitud mínima calibrada (610 mm) que requieren las normas. Para lograr la sujeción del dispositivo con el torón, se habilitaron placas de acero que fueron perforadas y desbastadas, y colocadas con calzas de aluminio. Asimismo, se requirió de una barra redonda lisa de acero y perillas de plástico con tornillo. En la figura 4.3 se ilustra el dispositivo montado en un torón de prueba, así como las dimensiones de sus accesorios.

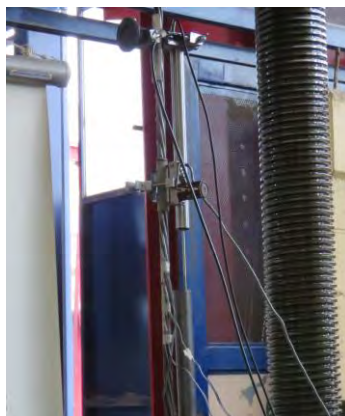


**Figura 4.3 Colocación del LVDT en espécimen de prueba**

Se utilizó un transductor de desplazamiento lineal (LVDT) de la marca INSTRON modelo 2601-094, que previamente fue calibrado por medio de una cabeza micrométrica marca Mitutoyo. Las principales características del transductor son:

- Trazo lineal  $\pm 50$  mm
- Carrera máxima  $\pm 62$  mm
- Sensibilidad  $< 0.008$  ( $\%/^{\circ}\text{C}$ )

Aprovechando la disponibilidad, y con el propósito de enriquecer la información generada durante las pruebas, en la ejecución de las correspondientes a la primera etapa se utilizó simultáneamente un extensómetro de la marca INSTRON modelo TIM, que cuenta con una longitud calibrada de 50 mm (figura 4.4). Sin embargo, debido a que los resultados mostraron magnitudes inconsistentes, se decidió no utilizarlo en las pruebas de las dos etapas posteriores.



**Figura 4.4 Colocación del extensómetro modelo TIM durante las pruebas de la primera etapa**

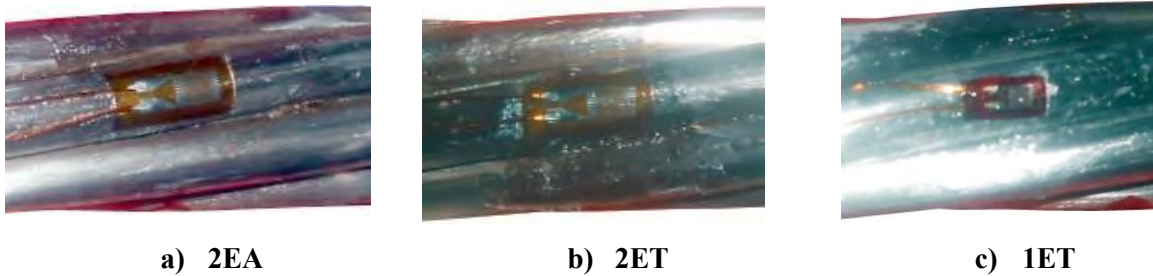
#### 4.2.3.2 Deformímetros electrónicos (*strain gages*)

Para definir los tipos de deformímetros a utilizar, así como su distribución en los especímenes de prueba, se hicieron una serie de pruebas preliminares que se describen a detalle en el apéndice B. Finalmente, se utilizaron dos tipos distintos de la marca TML Tokyo Sokki Kenkyujo, cuyas características se presentan en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Características de *strain gages* utilizados**

Características	YEFLA-2-5LT	FLA-1-11-5LT
Longitud	2 mm	1 mm
Ancho	1.8 mm	1.1 mm
Factor	$2.16 \pm 2\%$	$2.14 \pm 1\%$
Resistencia	$119.5 \pm 0.5 \Omega$	$120 \pm 0.5 \Omega$
Sensibilidad transversal	0.0 %	1.1 %

El *strain gage* YEFLA-2-5LT tiene la particularidad de medir grandes deformaciones unitarias (10 a 15%), y dado que, en las pruebas se esperaba medir deformaciones unitarias por encima del 5%, se consideró apropiado utilizarlo. En cada espécimen de prueba se colocaron tres *strain gages* como se ilustra en la figura 4.5:



**Figura 4.5 Identificación de *strain gages* utilizados**

donde

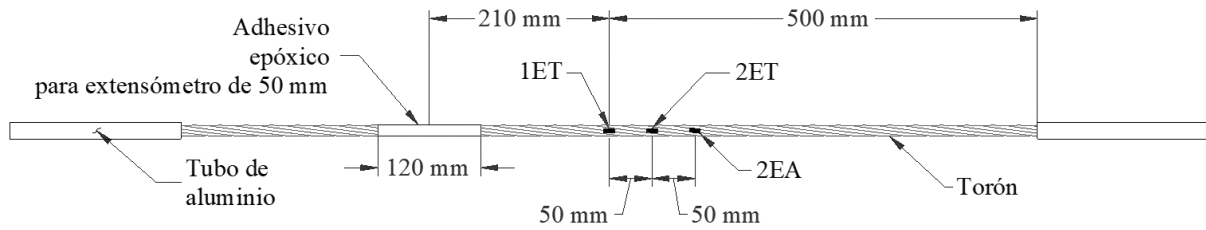
2EA *strain gage* YEFLA-2-5LT orientado de acuerdo al eje del alambre

2ET *strain gage* YEFLA-2-5LT orientado de acuerdo al eje del torón

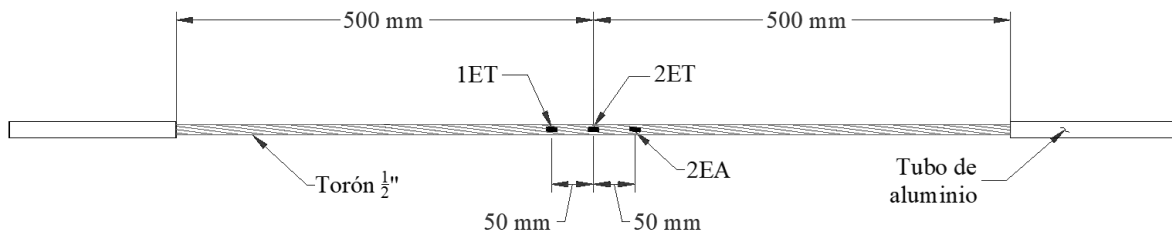
1ET *strain gage* FLA-1-11-5LT orientado de acuerdo al eje del torón

Como se menciona en el apéndice B, en los primeros 15 torones probados se colocó adhesivo epóxico para fijar el extensómetro modelo T1M (figura 4.4). La distribución de los deformímetros

que se utilizó en estos especímenes fue como se ilustra en la figura 4.6a, para el resto de los torones, se hizo como se muestra en la figura 4.6b.



**a) Especímenes 1-15 (etapa 1)**



**b) Especímenes 16-25 (etapa 2 y 3)**

**Figura 4.6 Distribución de *strain gages* en especímenes de prueba**

#### 4.2.3.3 Equipo de adquisición de datos

La operación de la máquina universal se realizó desde la cabina de control con una computadora de escritorio mediante el software Bluehill® de Instron. Los datos obtenidos son la extensión y carga de la cruceta de la máquina universal, así como la extensión del LVDT en archivos con formato csv.

Las deformaciones unitarias medidas con los *strain gages* fueron registradas por el equipo de adquisición de datos TDS modelo 300 de la marca TML Tokyo Sokki Kenkyujo conectado a cajas externas de conexiones y controlado por una computadora portátil como se muestra en la figura 4.7, los datos de salida se obtuvieron en archivos de texto. En todas las pruebas, el inicio del registro se hizo de forma sincronizada entre el software Bluehill® de la máquina universal y el TDS, con pasos de tiempo de un segundo.



**Figura 4.7 Equipos utilizados durante las pruebas**

#### **4.2.4 PROCEDIMIENTO**

El protocolo que se siguió para cada espécimen de prueba se describe a continuación:

1. Se montó el espécimen en la máquina universal sujetando sus extremos con las mordazas y cuidando su verticalidad para evitar cualquier posible concentración de esfuerzos que pudieran ocasionar una falla prematura del espécimen.
2. Se aplicó una precarga de aproximadamente 200 kg para asentar las mordazas y redefinir la verticalidad del espécimen.
3. Se montó y sujetó el transductor LVDT cuidando su verticalidad y la de la barra de acero, se colocaron las calzas de aluminio y se apretaron a tope las perillas con tornillo.
4. Se conectaron los cables de los tres deformímetros (2EA, 2ET Y 1ET) al TDS, y se inició la prueba sincronizando el registro de datos de la máquina universal con el TDS, con pasos de tiempo de un segundo. La velocidad de desplazamiento que se utilizó, en promedio, fue de 7 mm/min  $\approx$  14000 kg/cm<sup>2</sup>/min.
5. Al llegar a la carga de 18000 kg (aproximadamente 1% de elongación y 95% de la carga de ruptura), se retiró el transductor para evitar que se dañara por alguna falla temprana de los alambres del torón. Posteriormente, se continuó la prueba hasta llevar el espécimen a la ruptura.
6. Se llevó a cabo el registro fotográfico.
7. Por último, se liberaron los segmentos de torón de las mordazas para ser identificados y almacenados.

## 4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.3.1 INTRODUCCIÓN

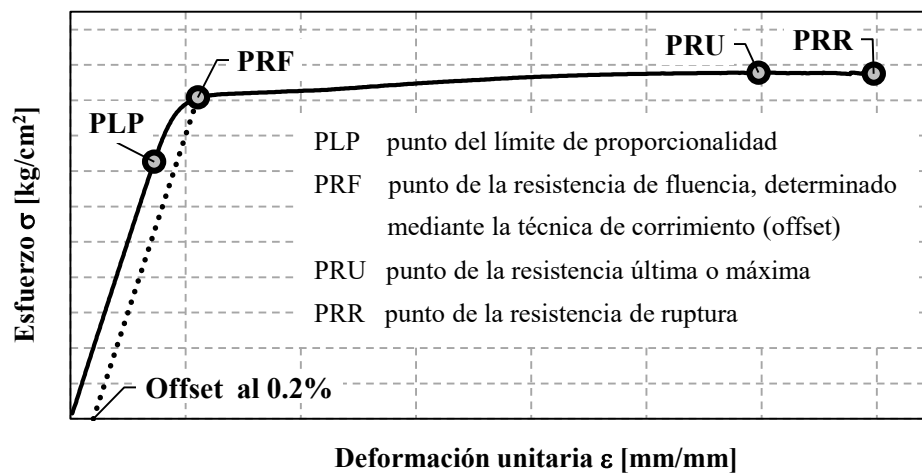
#### 4.3.1.1 Pruebas de tensión

En este capítulo se presentan y analizan los resultados de las 25 pruebas de tensión que se realizaron. De los datos obtenidos, para cada espécimen se graficaron sus curvas esfuerzo-deformación a partir de las cuales se calcularon los siguientes parámetros:

- a) Resistencia de ruptura
- b) Resistencia de fluencia
- c) Elongación
- d) Módulo de elasticidad

Los resultados de los tres primeros incisos se compararon con los mínimos requeridos por las normas NMX-B-292-CANACERO (2011) y ASTM A416 (2016). De acuerdo con los lineamientos de dichas normas, las pruebas deben invalidarse en caso de que resulten magnitudes menores. No obstante, de acuerdo a la misma normatividad, si cualquier muestra de torón se rompe en las mordazas, al inicio de éstas o fuera del transductor y, sin embargo, cumple con las magnitudes mínimas especificadas, se considera que cumple con los requisitos de propiedades mecánicas.

De acuerdo a los trabajos realizados por Hill (2006) y Loflin (2008), el acero de presfuerzo posee una ductilidad importante, lo cual se observó al generar las curvas esfuerzo-deformación en donde se obtuvieron grandes deformaciones unitarias últimas. En la figura 4.8 se ilustra la curva típica obtenida en este trabajo.



**Figura 4.8 Ilustración de las propiedades de esfuerzo-deformación evaluadas durante este trabajo**

donde

PLP punto del límite de proporcionalidad

PRF punto de la resistencia de fluencia, determinado mediante la técnica de corrimiento (offset)

PRU punto de la resistencia última o máxima

PRR punto de la resistencia de ruptura

En gran parte de las investigaciones anteriores donde se han determinado curvas esfuerzo-deformación para el acero de presfuerzo (por ejemplo, Hill 2006 y Loflin 2008), así como en algunos manuales de diseño (por ejemplo, PCI 2004), se reporta como la curva típica del acero de presfuerzo hasta el punto PRU, ignorando el punto PRR. Esto puede deberse a que la diferencia de magnitudes de esfuerzo entre estos dos puntos es menor que 1%. Sin embargo, en este trabajo sí se toma en cuenta para tener las curvas reales completas.

#### **4.3.1.2 Algoritmo de corrección para obtener las curvas esfuerzo-deformación**

Como se mencionó en la sección 4.2.4, durante las pruebas se retiró el transductor cuando se alcanzó una carga de 18000 kg, equivalente a una deformación unitaria de aproximadamente 1 %. Para obtener las curvas esfuerzo-deformación completas, se utilizaron las lecturas de extensión registradas por la cruceta de la máquina universal una vez retirado el transductor. Estas lecturas se corrigieron y normalizaron usando el siguiente algoritmo que se encuentra disponible en el manual de usuario del software Bluehill® de Instron. La ecuación utilizada es:

$$EXT_{CORR}(D) = (D - D_p) \cdot \left( \frac{L_e}{L_o} \right) + EXT_p \quad (4.1)$$

donde

EXT<sub>CORR</sub> extensión corregida (mm)

L<sub>e</sub> longitud inicial del transductor (610 mm)

L<sub>o</sub> longitud del espécimen entre mordazas (1000 mm)

P último punto de datos registrado antes de retirar el transductor

EXT<sub>p</sub> extensión en el punto p registrada por el transductor (mm)

D<sub>p</sub> extensión en el punto p registrada por la cruceta de la máquina universal (mm)

D extensión leída desde la cruceta de la máquina universal (mm)

#### 4.3.1.3 Generación de curvas esfuerzo-deformación

Para determinar el esfuerzo de tensión correspondiente al eje de las ordenadas, se dividió la carga de cada paso de tiempo entre el área de la sección transversal del torón. Para ello, se obtuvo el área real del torón que se utilizó, midiendo el diámetro de los alambres central y helicoidal con el apoyo de una cabeza micrométrica marca Mitutoyo como se muestra en la figura 4.9.



**Figura 4.9 Medición del diámetro de los alambres del torón con una cabeza micrométrica**

Para el alambre central se midieron 4.373 mm y para los alambres helicoidales 4.214 mm de diámetro. Considerando el alambre central y los seis alambres helicoidales se tiene que el área total del torón es de 98.7 mm<sup>2</sup>, que coincide con la nominal que especifican las normas.

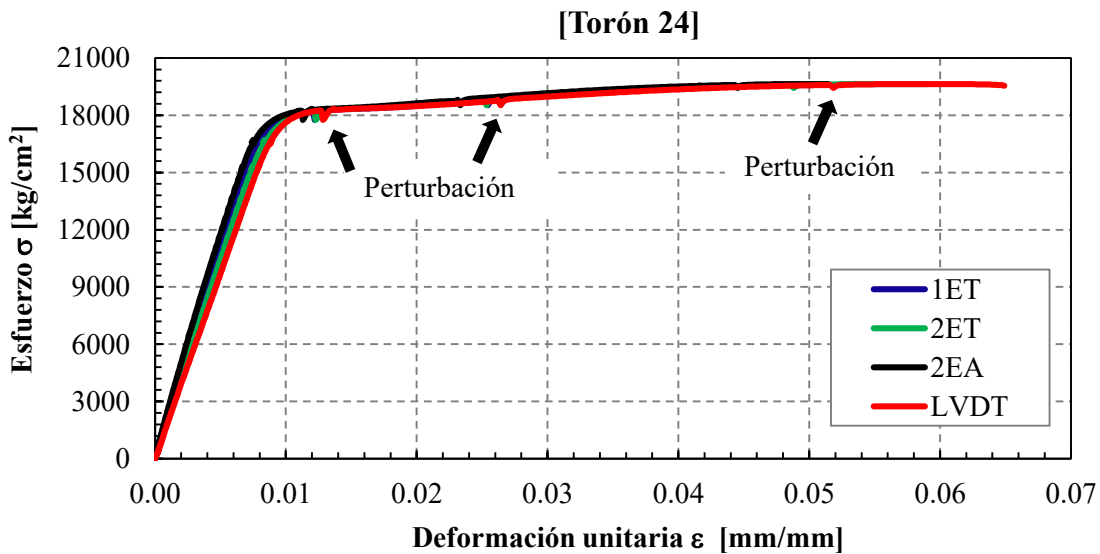
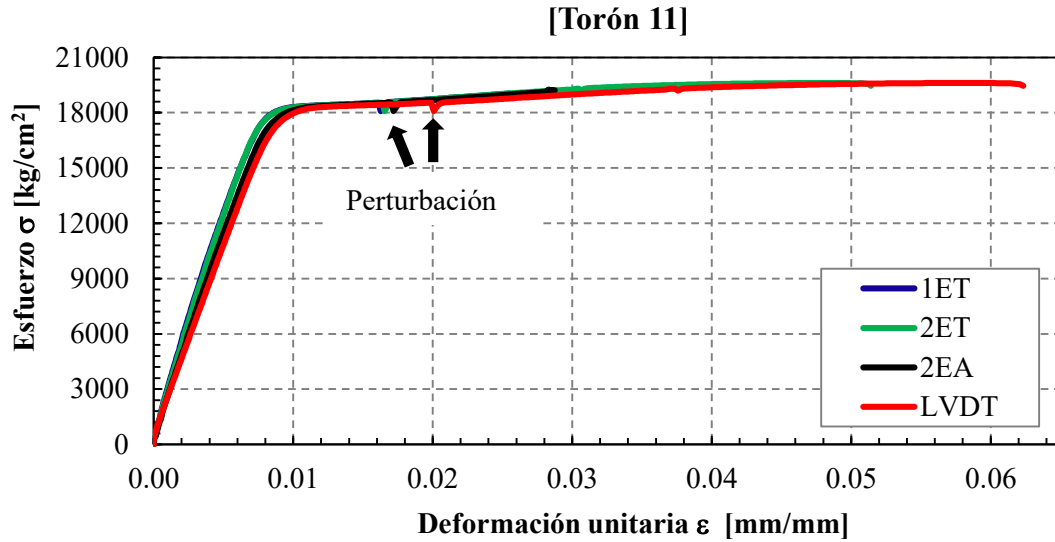
En cuanto a las deformaciones unitarias, para el caso del LVDT se obtuvieron dividiendo la extensión registrada en cada paso de tiempo entre la longitud calibrada (610 mm), y en los deformímetros (2EA, 2ET y 1ET), dado que el equipo de adquisición de datos considera un factor de 1000000; las lecturas se dividieron entre esa misma magnitud para obtener dichas deformaciones.

Para cada espécimen, se obtuvieron cuatro curvas esfuerzo-deformación; una del transductor (LVDT), y tres de los *strain gages* (2EA, 2ET y 1ET). Las curvas obtenidas en los 25 especímenes se muestran en el apéndice C. La mayoría de ellas, presentan ligeras perturbaciones ocasionadas por deslizamientos que se presentaron durante la ejecución de las pruebas. Esto indica, que el método de sujeción utilizado en los extremos de los especímenes, en conjunto con los dispositivos de sujeción propios de la máquina universal, no fueron del todo eficientes.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran las curvas obtenidas en los torones 11 y 24, respectivamente. En ellas, se distingue que las perturbaciones se presentaron en distintos puntos de la curva, por lo que se considera que éstas no representan una condición mecánica del material, sino como ya se



comentó, se atribuyen a deficiencias en el mecanismo de sujeción. Bajo esta consideración, en todas las curvas del apéndice C se eliminaron las perturbaciones más pronunciadas antes de calcular las curvas promedio y los parámetros indicados en los incisos a, b, c, y d, de la sección 4.3.1.1.



En la figura 4.12 se muestra una de las curvas esfuerzo-deformación reportada por Loflin (2008) para acero de presfuerzo con propiedades geométricas y mecánicas similares al que se utilizó en este trabajo, en donde la sujeción del espécimen tuvo un mejor desempeño ya que no se observan perturbaciones a lo largo de la curva.

### T.5R.270.A.1

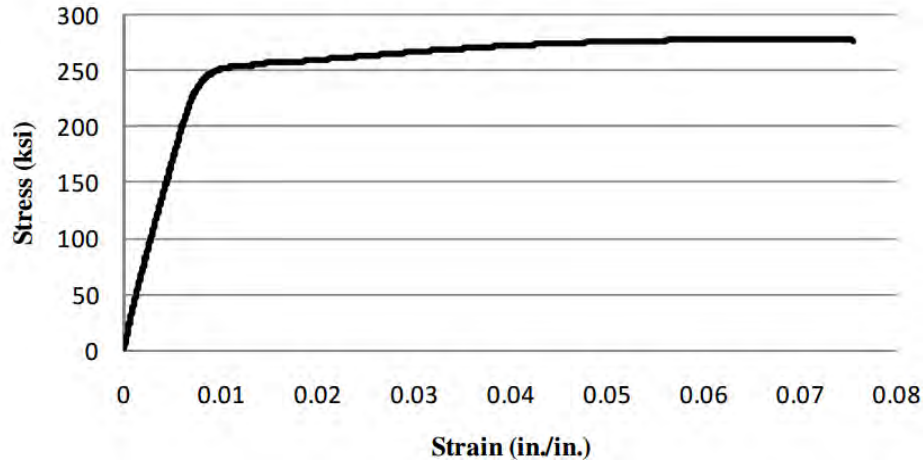


Figura 4.12 Curva esfuerzo-deformación (Loflin 2008)

#### 4.3.1.4 Análisis de resultados utilizando el criterio de Chauvenet

Es común que en los resultados recopilados de una serie de pruebas experimentales existan datos dudosos cuya magnitud resalta en comparación con el resto del conjunto de datos, lo cual puede deberse entre otras cosas, a mediciones erróneas. En estos casos, tal como lo menciona Taylor (1997) se debe decidir si el dato dudoso resultó de algún error y debe ser rechazado, o de lo contrario debe ser utilizado en conjunto con los demás datos. Para tomar esta decisión se deben utilizar criterios coherentes. En este trabajo de investigación, se utilizó el criterio de Chauvenet, que proporciona un método consistente para saber si se desecha o no el dato dudoso. Es importante mencionar que los datos pueden ser eliminados del análisis, pero nunca deben ser eliminados del conjunto de datos. A continuación, se da una descripción de cómo se aplica dicho criterio (Taylor 1997):

Suponiendo que se toman  $n$  mediciones de una determinada cantidad, y  $n$  es lo suficientemente grande como para que se pueda esperar que los resultados sigan una distribución de errores Gaussiana (Normal), esta distribución puede usarse para calcular la probabilidad de que una lectura dada se desvíe una cierta cantidad de la media. Una probabilidad mucho menor que  $1/n$  es muy poco probable que ocurra en un conjunto de  $n$  mediciones.

El criterio de Chauvenet especifica que una lectura puede ser rechazada si la probabilidad de obtener la desviación particular de la media es menor que  $1/(2n)$ . La tabla 4.2 muestra las magnitudes máximas aceptables de la relación entre la desviación media y la desviación estándar para diversas magnitudes de  $n$  según este criterio.

**Tabla 4.2 Criterio de Chauvenet para rechazar una lectura**

Número de lecturas [n]	Relación entre la desviación media máxima aceptable y la desviación estándar [d <sub>máx</sub> /σ]
3	1.38
4	1.54
5	1.65
6	1.73
7	1.8
10	1.96
15	2.13
25	2.33
50	2.57
100	2.81
300	3.14
500	3.29
1000	3.48

Al aplicar el criterio de Chauvenet para considerar la eliminación de datos dudosos, primero se calcula el valor medio y la desviación estándar utilizando todos los datos recopilados. Las desviaciones de los datos individuales de la media, se comparan con la desviación estándar de referencia, que depende del número de datos de acuerdo con la información de la tabla 4.2. Si se supera la magnitud máxima aceptable, los datos en cuestión se eliminan del análisis. Para el análisis final de los datos, se calcula un nuevo valor medio y una desviación estándar con los datos rechazados eliminados. Un punto importante, es que el criterio de Chauvenet sólo puede utilizarse una vez.

Los términos estadísticos que se requieren para aplicar este criterio son:

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.2)$$

$$d_i = x_i - x_m \quad (4.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \quad (4.4)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2} \quad (4.5)$$

$$\left| \bar{d}_i \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_m| \quad (4.6)$$

donde

$x_m$  promedio aritmético

$d_i$  desviación

$\sigma^2$  varianza

$\sigma$  desviación estándar muestra. Considerando que se tiene una pequeña cantidad de muestras, se utilizó esta ecuación en lugar de la ecuación de desviación estándar clásica

$\left| \bar{d}_i \right|$  promedio absoluto de las desviaciones

Se aplicó el criterio de Chauvenet al conjunto de datos de cada prueba, con el propósito de identificar magnitudes dudosas a partir de las cuales sería posible invalidar o descartar las pruebas. El análisis se aplicó a los resultados de los cuatro dispositivos de medición (LVDT, 2EA, 2ET y 1ET), en donde se eligió como parámetro de evaluación a la resistencia de ruptura.

### 4.3.2 RESISTENCIA DE RUPTURA

La resistencia de ruptura se define como la carga máxima a la cual uno o varios alambres del torón se rompen. Si el esfuerzo de ruptura de un torón utilizado en un determinado elemento de concreto presforzado resulta menor al esfuerzo esperado a la resistencia nominal del elemento, el miembro podría fallar de forma prematura. Por esta razón, es muy importante que el torón de presfuerzo tenga una resistencia a la tensión mayor o igual que su resistencia esperada.

Para el tipo de torón en estudio, de acuerdo a las normas NMX-B-292-CANACERO (2011) y ASTM A416 (2016), se tiene que el esfuerzo de ruptura mínimo requerido es de 270 ksi  $\approx$  19000 kg/cm<sup>2</sup>. El esfuerzo de ruptura se calculó dividiendo la carga registrada al instante de romperse el torón entre su área (98.7 mm<sup>2</sup>).

De las 25 pruebas realizadas, no todas resultaron exitosas como se muestra en la tabla 4.3. Para el caso de los *strain gages* (2EA, 1ET y 2ET) los torones 3, 6 y 7 no muestran resultados porque al instante de realizar las pruebas se presentaron deslizamientos considerables en las mordazas que ocasionaron que no se llegara a la ruptura.

En lo que respecta a las curvas del transductor (LVDT), los torones 3, 6, y 7 no muestran resultados debido a lo descrito en el párrafo anterior. Asimismo, los torones 1 y 2 no contienen datos ya que en estas dos primeras pruebas aún no se tenía del todo claro en qué instante debía retirarse el transductor, y se retiró antes de llegar al punto de proporcionalidad, lejos de la resistencia de

fluencia. Por esta razón, los datos fueron omitidos. Por último, los datos del torón 8 de igual forma fueron descartados a causa de la excesiva magnitud de precarga que se indujo a este espécimen (aproximadamente 3300 kg), con respecto a la precarga promedio (aproximadamente 200 kg) que se aplicó en las demás pruebas. Esto ocasionó que la curva presentara un desfase excesivo con respecto al resto de las curvas, motivo por el cual se decidió excluir sus datos de los análisis.

Los resultados obtenidos se presentan a detalle en la tabla D.1 del apéndice D, en donde se observa que todos los especímenes excedieron la resistencia mínima requerida,  $f_{pu}$ , en un 3% en promedio. Cumpliendo así, con el primer requisito que exigen las normas NMX-B-292-CANACERO (2011) y ASTM A416 (2016). En la tabla 4.3 se presenta un resumen de los resultados, en donde se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada dispositivo.

**Tabla 4.3 Resumen estadístico de resistencias de ruptura**

	<b>2EA</b>		<b>1ET</b>		<b>2ET</b>		<b>LVDT</b>	
<b>Término estadístico</b>	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$
<b>Promedio:</b>	<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19483</b>	<b>1.03</b>
<b>Desv. Estándar:</b>	<b>105.76</b>		<b>105.76</b>		<b>105.76</b>		<b>101.80</b>	
<b>C.V. [%]:</b>	<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.52</b>	

Además, en la última columna de la tabla D.1 del apéndice D se muestra el tipo de falla que se presentó al instante de romperse cada espécimen, en donde:

RCE    ruptura simultánea de los siete alambres al centro del espécimen

RZM    ruptura simultánea de los siete alambres en zona cercana a las mordazas

RAM    ruptura de un alambre en cualquier zona

NRE    no hubo ruptura en el espécimen

La distinción entre RCE y RZM se hizo considerando los tercios de la longitud de la muestra, siendo  $L_o=1000$  mm. Si la falla ocurrió en el tercio medio de  $L_o$ , el tipo de falla considerada fue RCE, de lo contrario RZM. Los tipos de falla que se presentaron se ilustran en la figura 4.13.



**a) RCE**



**b) RZM**



**c) RAM**



**d) NRE**

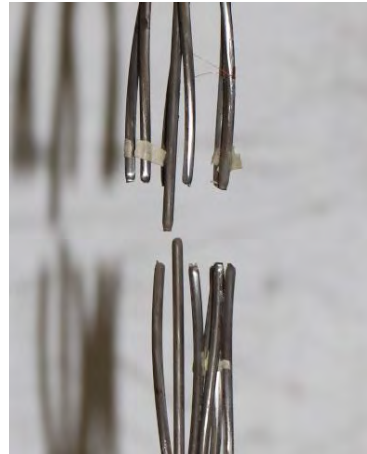
**Figura 4.13 Ilustración de los tipos de fallas presentadas en las pruebas de tensión**

Del total de las pruebas realizadas, nueve torones presentaron la falla tipo RCE, once RZM, dos RAM y tres NRE. Se tiene que 20 torones (80% del total) presentaron la falla simultánea de todos los alambres, lo cual significa que el método de sujeción utilizado con tubos de aluminio y adhesivo epóxico proporcionó buenos resultados. En cuanto a los dos torones que presentaron falla local en un alambre, se consideran aceptables teniendo en cuenta que superaron la resistencia mínima requerida.

De acuerdo con la caracterización de modos de falla en cables de acero realizada por Espejo y Martínez (2007), ante la carga de ruptura, todos los alambres se rompen con la formación de un cuello cuya magnitud está en función de la ductilidad del material. Obteniéndose así una fractura tipo copa-cono o desgarre a 45° de acuerdo con dichos autores. En la figura 4.14 se muestra la formación de este mecanismo en algunos de los especímenes probados, en donde se tuvo la falla simultánea de todos los alambres.



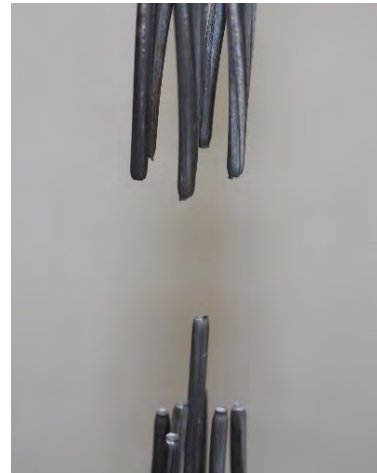
**a) Torón 16**



**b) Torón 17**



**c) Torón 20**



**d) Torón 25**

**Figura 4.14 Detalle de ruptura en alambres**

#### **4.3.2.1 Resistencia última**

Ésta se calculó dividiendo la carga máxima (carga última) registrada durante la prueba entre el área torón ( $98.7 \text{ mm}^2$ ). Los resultados se presentan en la tabla D.2 del apéndice D.

Al revisar y comparar detalladamente las magnitudes de resistencia de ruptura y resistencia última, se tiene que la diferencia promedio entre ambas es menor de 1%. Sin embargo, a pesar de esta mínima diferencia se decidió reportar las magnitudes de las dos resistencias.

#### **4.3.2.2 Aplicación del criterio de Chauvenet a los resultados del LDVT**

Considerando que el número de lecturas es  $n=19$ , de acuerdo con la tabla 4.2 se tiene una relación de desviaciones máxima permitida de  $d_{\text{máx}}/\sigma=2.21$ , al realizar los cálculos ninguna magnitud de la

relación  $d_i/\sigma$  excedió dicho límite (tabla 4.4). Por lo tanto, se concluye que de acuerdo al criterio de Chauvenet ninguna prueba debe ser excluida.

**Tabla 4.4 Criterio de Chauvenet para resistencias de ruptura del LVDT**

Esp	n	$x_i$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$d_i=x_i-x_m$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$(x_i-x_m)^2$ [kg/cm <sup>2</sup> ] <sup>2</sup>	$d_i/\sigma$
Torón 4	1	19554	71.07	5051	0.70
Torón 5	2	19541	57.79	3340	0.57
Torón 9	3	19462	-20.95	439	0.21
Torón 10	4	19581	98.22	9647	0.96
Torón 11	5	19458	-24.98	624	0.25
Torón 12	6	19669	185.66	34469	1.82
Torón 13	7	19456	-27.21	740	0.27
Torón 14	8	19555	72.18	5210	0.71
Torón 15	9	19509	25.78	665	0.25
Torón 16	10	19374	-109.18	11919	1.07
Torón 17	11	19631	147.26	21685	1.45
Torón 18	12	19497	14.13	200	0.14
Torón 19	13	19345	-137.95	19030	1.36
Torón 20	14	19296	-187.49	35154	1.84
Torón 21	15	19473	-10.19	104	0.10
Torón 22	16	19408	-74.83	5599	0.74
Torón 23	17	19504	21.22	450	0.21
Torón 24	18	19550	66.31	4396	0.65
Torón 25	19	19316	-166.83	27831	1.64

En cuanto a los términos estadísticos, aplicando las ecuaciones 4.2 a 4.6 se determinaron como:

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 19483 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (4.7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 = 9819 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]^2 \quad (4.8)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right]^{1/2} = 101.80 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (4.9)$$

$$\left| \bar{d}_i \right| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |d_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x_m| = 79.96 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad (4.10)$$



#### 4.3.2.3 Aplicación del criterio de Chauvenet a los resultados de los *strain gages* (2EA, 2ET y 1ET)

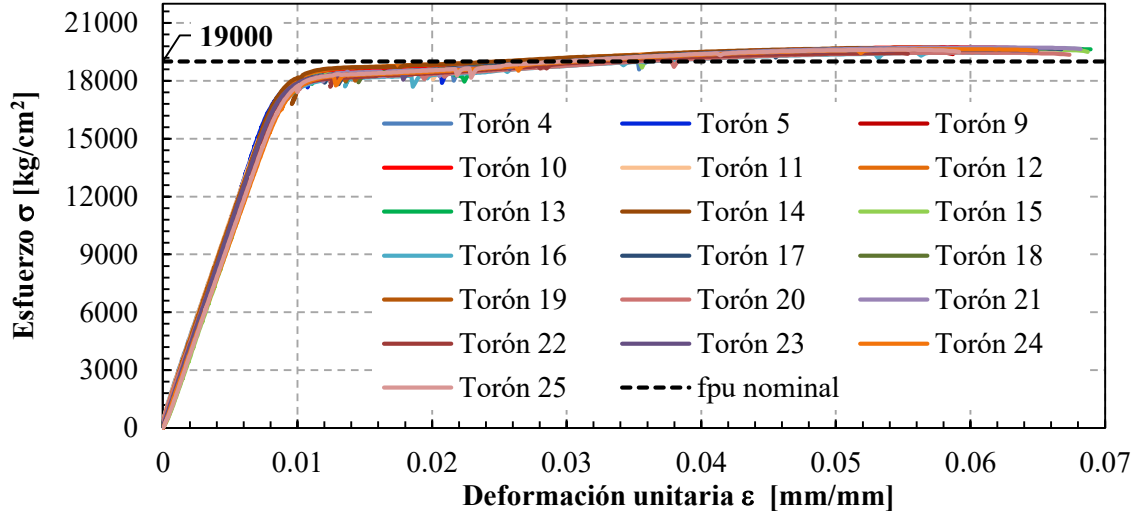
En el caso de los *strain gages* el número de lecturas es  $n=22$ , y la relación de desviaciones máxima permitida es  $d_{\text{máx}}/\sigma=2.27$  (tabla 4.2). De acuerdo con la tabla 4.5, ninguna magnitud de la relación  $d_i/\sigma$  excede dicho límite, por lo que se concluye que de acuerdo al criterio de Chauvenet ninguna prueba debe invalidarse.

**Tabla 4.5 Criterio de Chauvenet para resistencias de ruptura de los *strain gages***

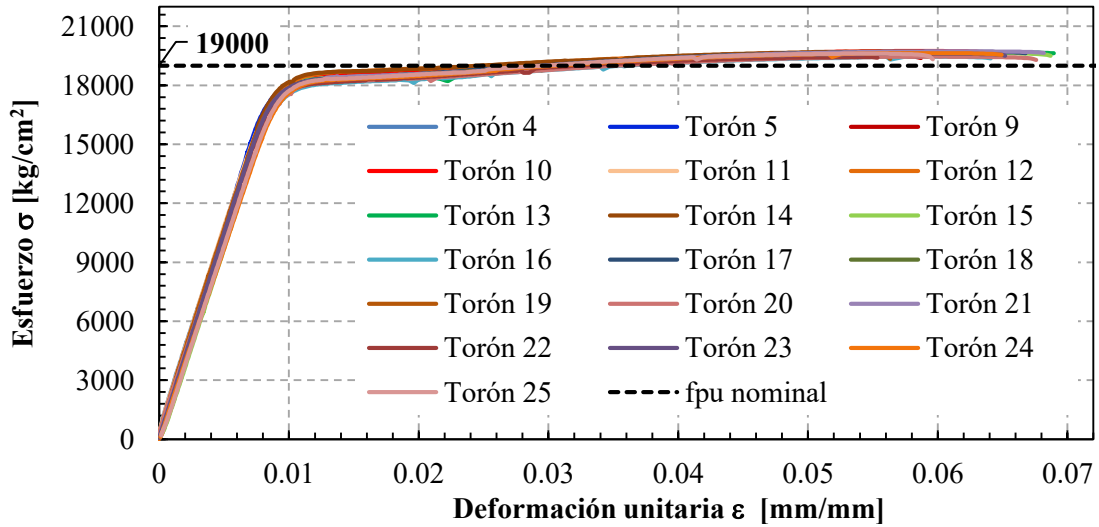
Esp	n	$\bar{x}_i$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$d_i=\bar{x}_i-\bar{x}_m$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$(\bar{x}_i-\bar{x}_m)^2$ [kg/cm <sup>2</sup> ] <sup>2</sup>	$d_i/\sigma$
Torón 1	1	19443	-51.33	2634	0.49
Torón 2	2	19554	59.62	3554	0.56
Torón 4	3	19554	60.12	3615	0.57
Torón 5	4	19541	46.85	2195	0.44
Torón 8	5	19694	199.64	39855	1.89
Torón 9	6	19462	-31.9	1018	0.30
Torón 10	7	19581	87.28	7617	0.83
Torón 11	8	19458	-35.92	1291	0.34
Torón 12	9	19669	174.71	30525	1.65
Torón 13	10	19456	-38.15	1456	0.36
Torón 14	11	19555	61.24	3750	0.58
Torón 15	12	19509	14.83	220	0.14
Torón 16	13	19374	-120.12	14429	1.14
Torón 17	14	19631	136.31	18582	1.29
Torón 18	15	19497	3.18	10	0.03
Torón 19	16	19345	-148.89	22169	1.41
Torón 20	17	19296	-198.44	39377	1.88
Torón 21	18	19473	-21.13	447	0.20
Torón 22	19	19408	-85.77	7357	0.81
Torón 23	20	19504	10.28	106	0.10
Torón 24	21	19550	55.36	3065	0.52
Torón 25	22	19316	-177.77	31602	1.68

#### 4.3.3 CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA

Las curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el LVDT, antes y después de eliminar las perturbaciones más pronunciadas (sección 4.3.1.3), se presentan en las figuras 4.15a y 4.15b, respectivamente. En ambas figuras, se indica gráficamente la resistencia de ruptura mínima requerida (línea punteada en color negro).



**a) Con perturbaciones**

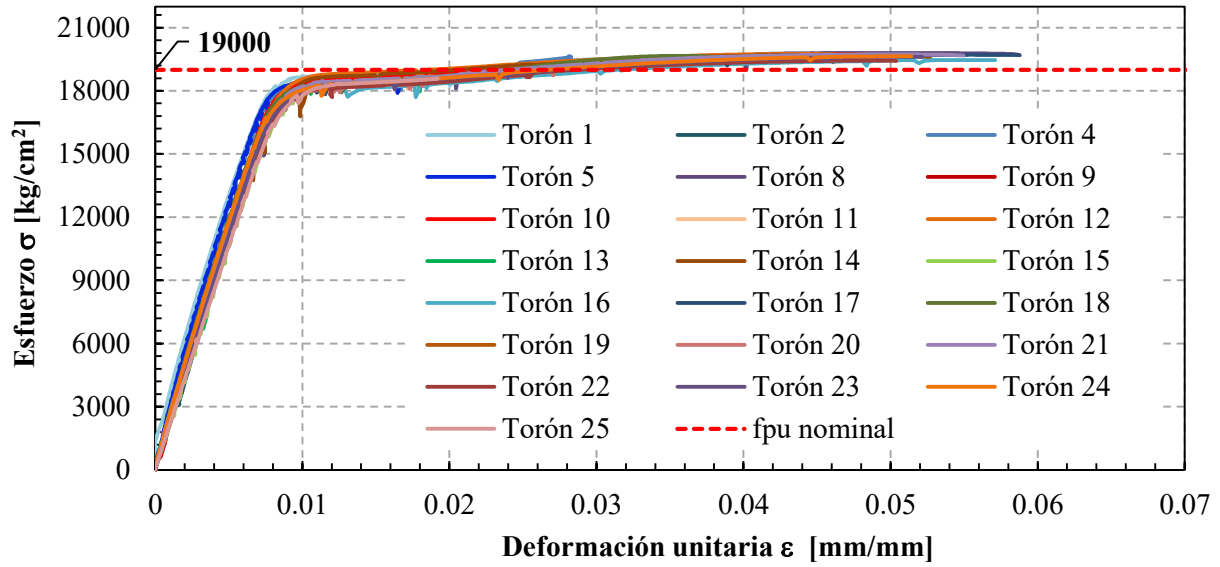


**b) Sin perturbaciones**

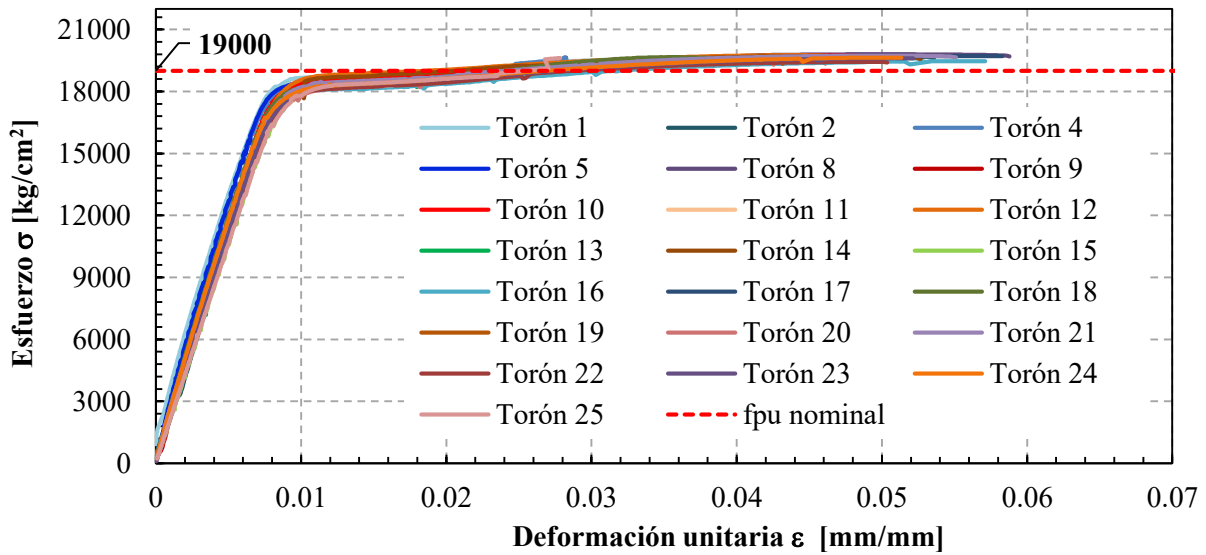
**Figura 4.15 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el transductor (LVDT)**

Como se aprecia en la figura 4.15, existe una buena correlación de las curvas puesto que hay muy poca desviación entre ellas. Además, reafirma lo mostrado en la tabla D.1 del apéndice D, donde todos los torones exceden la resistencia de tensión mínima requerida.

Asimismo, las curvas esfuerzo-deformación de los deformímetros 2EA, 1ET y 2ET, antes y después de eliminar las perturbaciones se ilustran en las figuras 4.16 a 4.18, respectivamente. En todas ellas, se observa una mayor desviación entre las curvas en comparación a los resultados obtenidos con el transductor. Esto es más notable en las curvas del *strain gage* 1ET (figura 4.18).

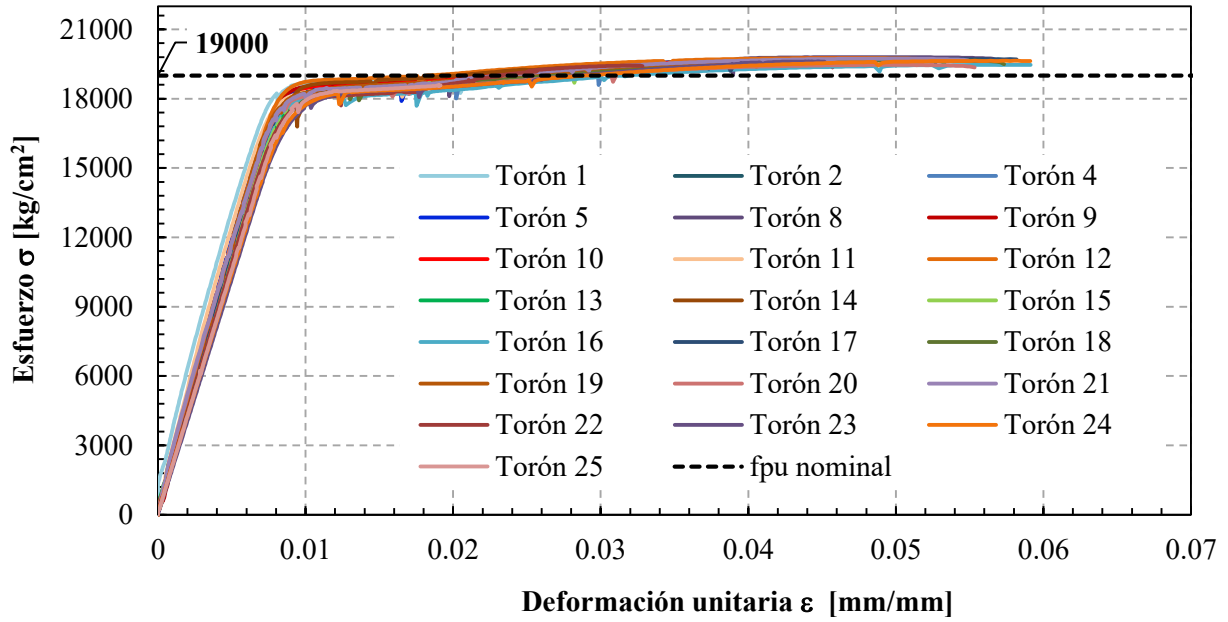


a) Con perturbaciones

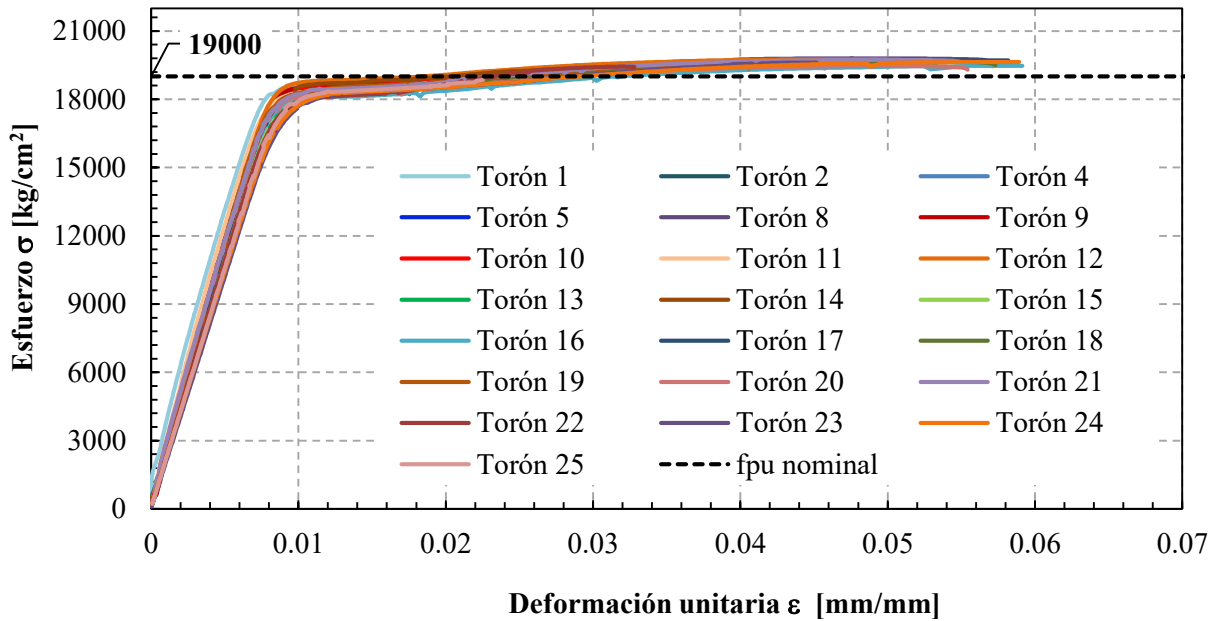


b) Sin perturbaciones

Figura 4.16 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el *strain gage* (2EA)

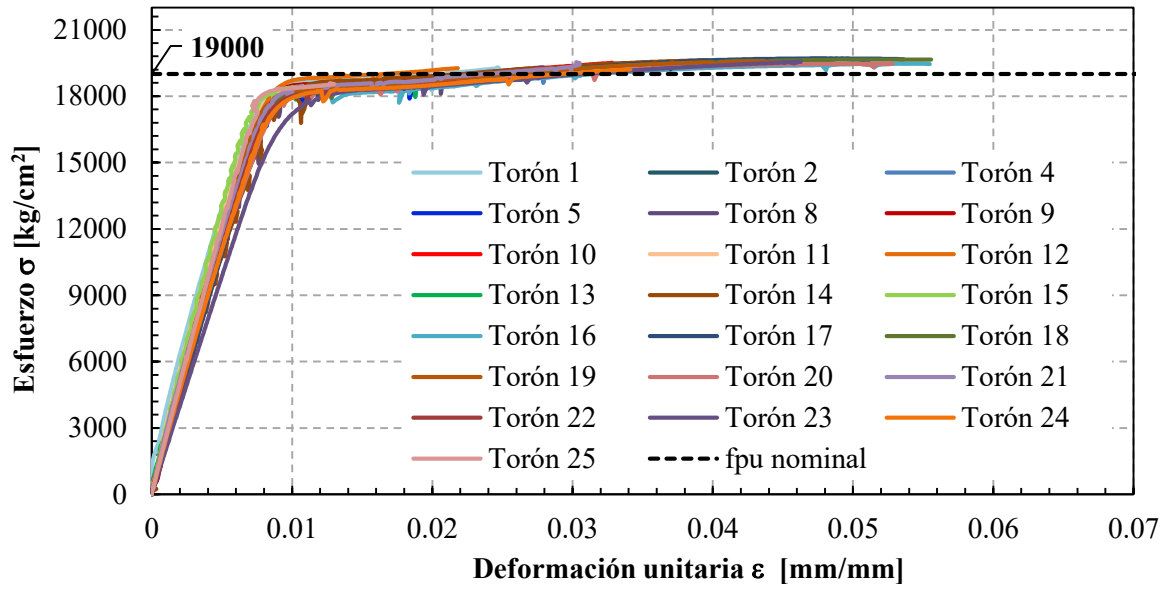


a) Con perturbaciones

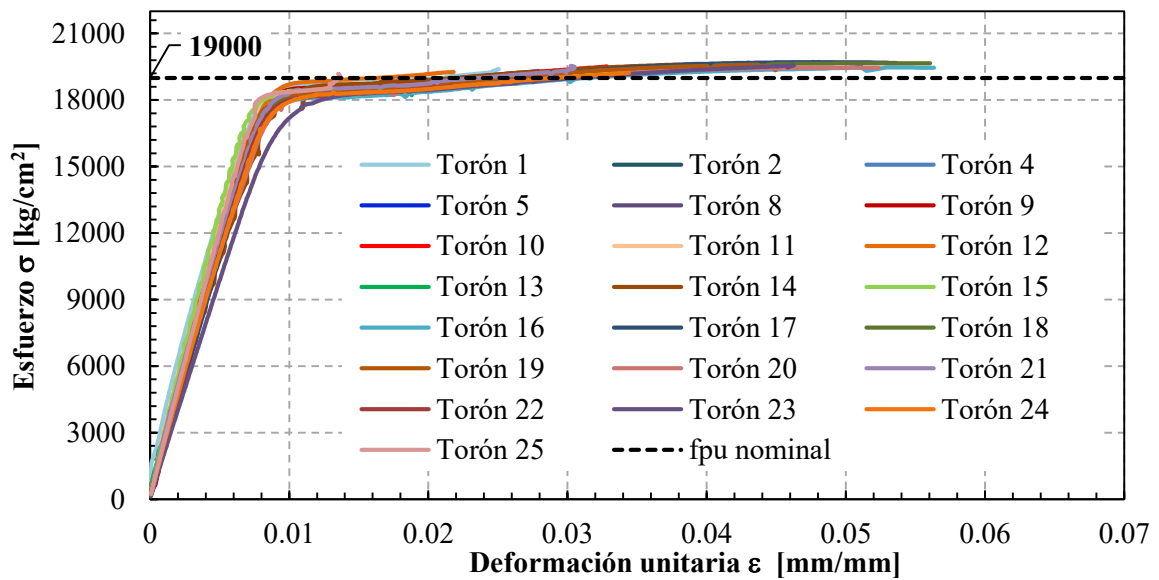


b) Sin perturbaciones

Figura 4.17 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el *strain gage* (2ET)



a) Con perturbaciones



b) Sin perturbaciones

Figura 4.18 Curvas esfuerzo-deformación obtenidas con el *strain gage* (1ET)

#### 4.3.4 RESISTENCIA DE FLUENCIA

Caso contrario a lo que se presenta comúnmente en la curva esfuerzo-deformación del acero de refuerzo dulce u ordinario (figura 4.19), el acero de presfuerzo no tiene una meseta de fluencia definida (Hill 2006).

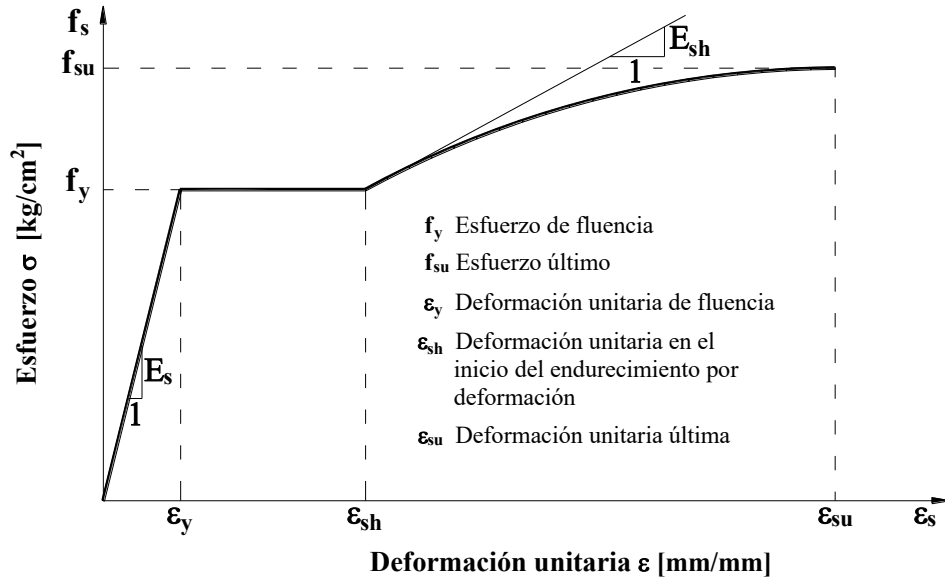


Figura 4.19 Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero (adaptada de Rodríguez y Botero 1997)

De acuerdo a las normas NMX-B-292-CANACERO (2011) Y ASTM A370 (2011), para torón de baja relajación, la resistencia de fluencia debe ser de al menos 90% de la resistencia a la tensión mínima. Dos de los métodos más usuales que ambas normas recomiendan para medir la resistencia de fluencia son:

- El método de extensión bajo carga al 1%*, en el que se debe aplicar una carga inicial a la muestra de torón cuya magnitud es recomendada en las normas de acuerdo al tipo de torón en estudio. Posteriormente, se incrementa la carga hasta que se obtenga con el transductor una deformación unitaria de 1%. La resistencia que se registra en ese instante, es la que se denomina como resistencia de fluencia.
- Método de deformación permanente especificada (offset)*, en el cual tomando como referencia la figura 4.20, se define el punto M que corresponde a una deformación unitaria de 0.2% (0.002), a partir de este punto se traza la línea M-N paralela a O-A (zona elástica) y se localiza la intersección de M-N con la curva esfuerzo-deformación, punto r, éste a su vez indica la resistencia R que corresponde a la resistencia de fluencia.

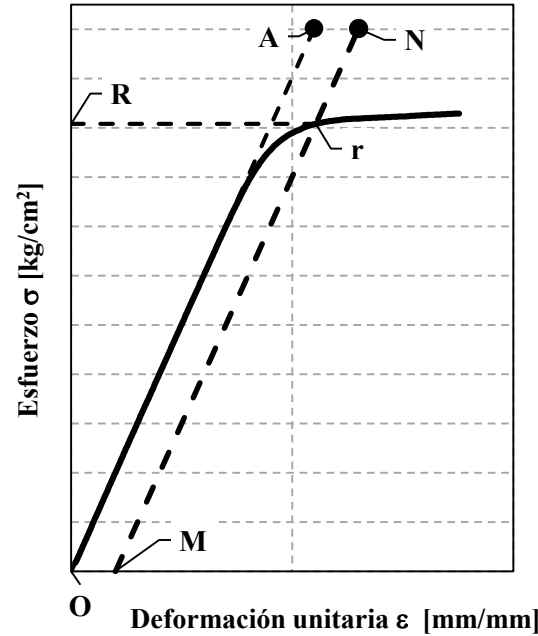


Figura 4.20 Método de deformación permanente (adaptada de NMX-B-172 1988)

Los resultados de las resistencias de fluencia medidas en las 25 pruebas se muestran a detalle en las tablas D.3 y D.4 del apéndice D. De acuerdo con dichos resultados, el cociente de la relación  $f_{pyp}/f_{py}$  en todos los casos fue mayor que la unidad, lo que indica que en todos se excedió la resistencia de fluencia mínima requerida por las normas NMX-B-292-CANACERO (2011) y ASTM A416 (2016). Las resistencias de fluencia promedio medidas para 2EA, 2ET y 1ET, son del orden del 7% mayor que la requerida en los tres casos. Para el caso del transductor, se tiene una resistencia superior en 6%.

En la tabla 4.6 se presenta un resumen de los resultados, en donde se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada dispositivo de medición.

Tabla 4.6 Resumen estadístico de resistencias de fluencia

	2EA		1ET		2ET		LVDT	
Término estadístico	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$
Promedio:	18237	1.07	18266	1.07	18256	1.07	18165	1.06
Desv. Estándar:	215.52		226.66		232.60		145.85	
C.V. [%]:	1.18		1.24		1.27		0.80	

### 4.3.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD

Considerando que el acero de presfuerzo tiene una composición química similar a la del acero de refuerzo ordinario, podría esperarse un módulo de elasticidad con magnitud similar (Loflin 2008).

Tanto las normas internacionales (ASTM A 416 2016 y ASTM A370 2011) como la nacional (NMX-B-292-CANACERO 2011) no recomiendan o regulan el módulo de elasticidad para acero de presfuerzo. El PCI (2004) recomienda utilizar una magnitud de 28500 ksi  $\approx$  2,003,748 kg/cm<sup>2</sup>. Asimismo, el manual Anippac (2000) recomienda una magnitud entre 1,900,000 kg/cm<sup>2</sup> y 1,960,000 kg/cm<sup>2</sup>. Por otra parte, Aalami (2014) considera razonable utilizar 27550 ksi  $\approx$  1,936,957 kg/cm<sup>2</sup>.

En este estudio, se calculó el módulo de elasticidad usando la ley de Hooke representada mediante la ecuación 4.11 (Hibbeler 2011). Esta ecuación representa la porción recta inicial del diagrama esfuerzo-deformación hasta el límite de proporcionalidad, en donde el módulo de elasticidad o módulo de Young representa la pendiente de dicha recta.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.11)$$

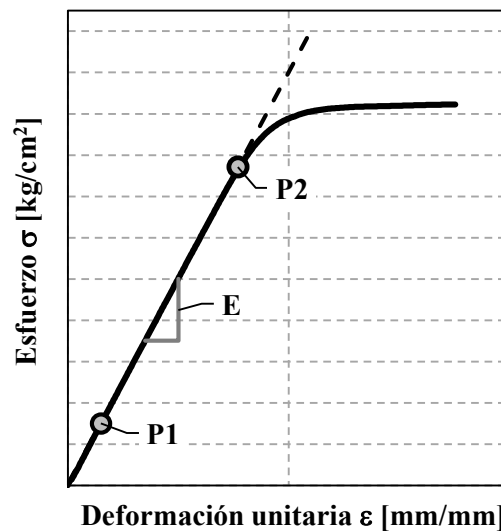
donde

$\sigma$     esfuerzo de tensión (kg/cm<sup>2</sup>)

$E$     módulo de elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)

$\varepsilon$     deformación unitaria (mm/mm)

Se determinó la región de proporcionalidad mediante la definición de dos puntos como se ilustra en la figura 4.21. Con un criterio similar al que utilizó Hill (2006), el punto P1 se definió en una resistencia cercana a 2000 kg/cm<sup>2</sup>, ya que a magnitudes menores las gráficas mostraron un comportamiento ligeramente inestable posiblemente por el reacomodo inicial que existió entre las mordazas y el torón. El punto P2 se refiere al límite de proporcionalidad, en promedio esta magnitud fue de aproximadamente 14500 kg/cm<sup>2</sup>. Una vez establecidos dichos puntos, se calculó la pendiente de la recta, definiendo así el módulo de elasticidad.



**Figura 4.21 Criterio para calcular el módulo de elasticidad**



En la tabla D.5 del apéndice D se presentan los módulos de elasticidad calculados, en la que se observa que con los tres *strain gages* se obtuvieron módulos de elasticidad promedio mayores con respecto al promedio obtenido con el transductor con una diferencia de 9%, aproximadamente. Esta diferencia puede deberse a que las deformaciones unitarias calculadas con el transductor corresponden a una longitud calibrada mediante dos puntos de control y además representa al conjunto de alambres (torón) y, por otro lado, las deformaciones medidas con los *strain gages* corresponden a deformaciones unitarias de un solo punto correspondientes a un alambre helicoidal.

Al hacer una relación de la magnitud promedio obtenida con el transductor (2,002,881 kg/cm<sup>2</sup>) y la magnitud recomendada (2,003,748 kg/cm<sup>2</sup>) por el PCI (2004), se tiene un factor igual a la prácticamente unidad (0.999). Esto indica que, al menos en la parte elástica, es aceptable tomar como referencia la recomendación del PCI (2004) para acero de presfuerzo con características similares al evaluado en este estudio. Al calcular la misma relación, pero ahora para los tres deformímetros, se tienen factores de 1.09, 1.09 y 1.10 para 2EA, 1ET y 2ET, respectivamente. En la tabla 4.7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

**Tabla 4.7 Resumen estadístico de módulos de elasticidad**

	2EA	1ET	2ET	LVDT
<b>Término estadístico</b>	<b>E</b> <b>[kg/cm<sup>2</sup>]</b>			
<b>Promedio:</b>	<b>2,187,943</b>	<b>2,186,744</b>	<b>2,201,170</b>	<b>2,002,881</b>
<b>Desv. Estándar:</b>	<b>89,905</b>	<b>115,955</b>	<b>85,720</b>	<b>43,228</b>
<b>C.V. [%]:</b>	<b>4.11</b>	<b>5.30</b>	<b>3.89</b>	<b>2.16</b>

#### 4.3.6 ELONGACIÓN

Como se mencionó en secciones anteriores, el acero de presfuerzo posee una gran ductilidad. Por lo tanto, es común obtener grandes magnitudes de elongación al realizar las pruebas de tensión con este material. Las normas ASTM A416 (2016) y NMX-B-292-CANACERO (2011) requieren que la elongación total del torón bajo carga sea como mínimo de 3.5%, la cual debe medirse en una longitud calibrada mínima de 610 mm. Hill (2006) y Loflin (2008) estimaron estas magnitudes utilizando un extensómetro con longitud calibrada de 50 mm, ya que no tuvieron disponible uno más grande. Sin embargo, en el presente trabajo si fue posible calcularlas con la longitud calibrada que exigen las normas debido a que se habilitó el dispositivo descrito en la sección 4.2.3.1.

La ecuación que se utilizó para el cálculo de la elongación es:

$$\varepsilon_{rup} = \frac{EXT_{rup} - EXT_p}{L_e} + \frac{EXT_p}{L_e} \quad (4.12)$$

donde

$\epsilon_{rup}$  deformación unitaria de ruptura del torón de presfuerzo

$EXT_{rup}$  extensión calculada con la ecuación 4.1 para la extensión D registrada en la ruptura del espécimen (mm)

En la tabla D.6 del apéndice D se presentan las elongaciones obtenidas con el transductor y los deformímetros. En muchos casos, los deformímetros dejaron de medir antes de llegar a la ruptura de los especímenes, lo cual se ve reflejado en las magnitudes de elongación promedio mostradas en la tabla 4.8. Por esta razón, se considera que estas magnitudes no son comparables con la mínima elongación que exigen las normas (3.5%). Además como ya se comentó, son mediciones que no parten de una longitud calibrada. Las elongaciones promedio para los deformímetros son 4.6%, 3.40% y 4.95% para 2EA, 2ET y 1ET, respectivamente.

En lo que respecta al transductor (LVDT), la elongación promedio calculada es de 6.31% (tabla 4.8). Esta magnitud cumple ampliamente con el 3.5% requerido por la normatividad. De acuerdo con la tabla D.6 del apéndice D, la mínima elongación (5.53%) la tuvo el torón 22 y la máxima (6.99%) el torón 13.

En la tabla 4.8 se presenta un resumen de los resultados, en donde se muestra el promedio, la desviación estándar y el coeficiente de variación de cada dispositivo.

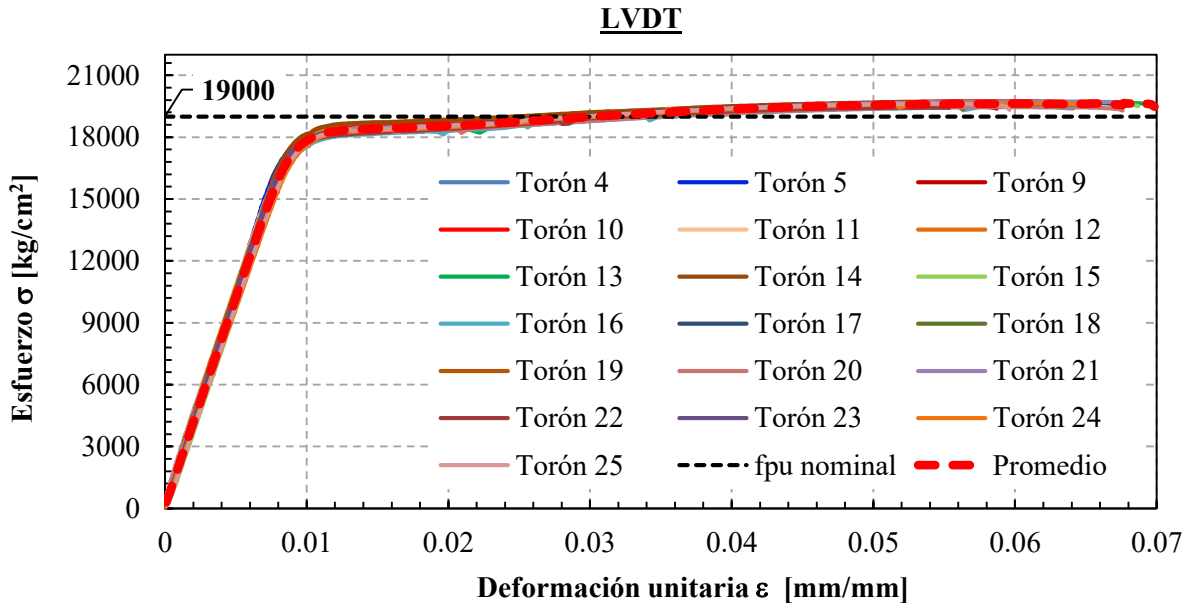
**Tabla 4.8 Resumen estadístico de elongaciones**

	2EA	1ET	2ET	LVDT
<b>Término estadístico</b>	<b>Elongación [%]</b>			
<b>Promedio:</b>	4.60	3.40	4.95	6.31
<b>Desv. Estándar:</b>	1.10	1.46	1.02	0.42
<b>C.V. [%]:</b>	23.93	42.97	20.56	6.64

#### **4.3.7 CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA PROMEDIO EXPERIMENTALES**

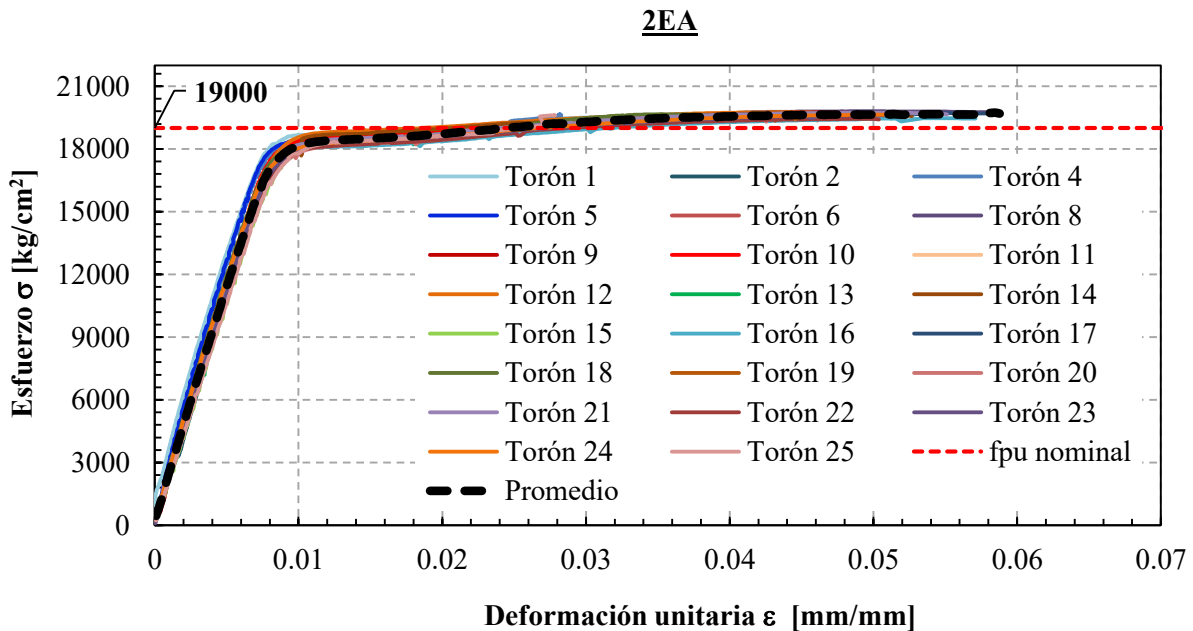
Calculadas las magnitudes de resistencia de ruptura, resistencia de fluencia, módulo de elasticidad y elongación, y habiendo realizado el análisis estadístico con el criterio de Chauvenet, se concluye que todos los torones considerados en los análisis cumplen con los requerimientos estipulados en las normas ASTM A416 (2016) y NMX-B-292-CANACERO (2011).

Posteriormente, se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación promedio a partir del conjunto de curvas sin perturbaciones. Estas curvas promedio fueron esenciales para estimar los esfuerzos efectivos como se detalla en el capítulo 6. En la figura 4.22 se presenta la curva promedio (punteada en color rojo) obtenida con el LVDT sobrepuesta con el conjunto de curvas.



**Figura 4.22** Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el transductor (LVDT)

En las figuras 4.23 a 4.25 se ilustran todas las curvas esfuerzo-deformación con sus respectivas curvas promedio obtenidas con los deformímetros 2EA, 2ET y 1ET, respectivamente.



**Figura 4.23** Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el *strain gage* (2EA)

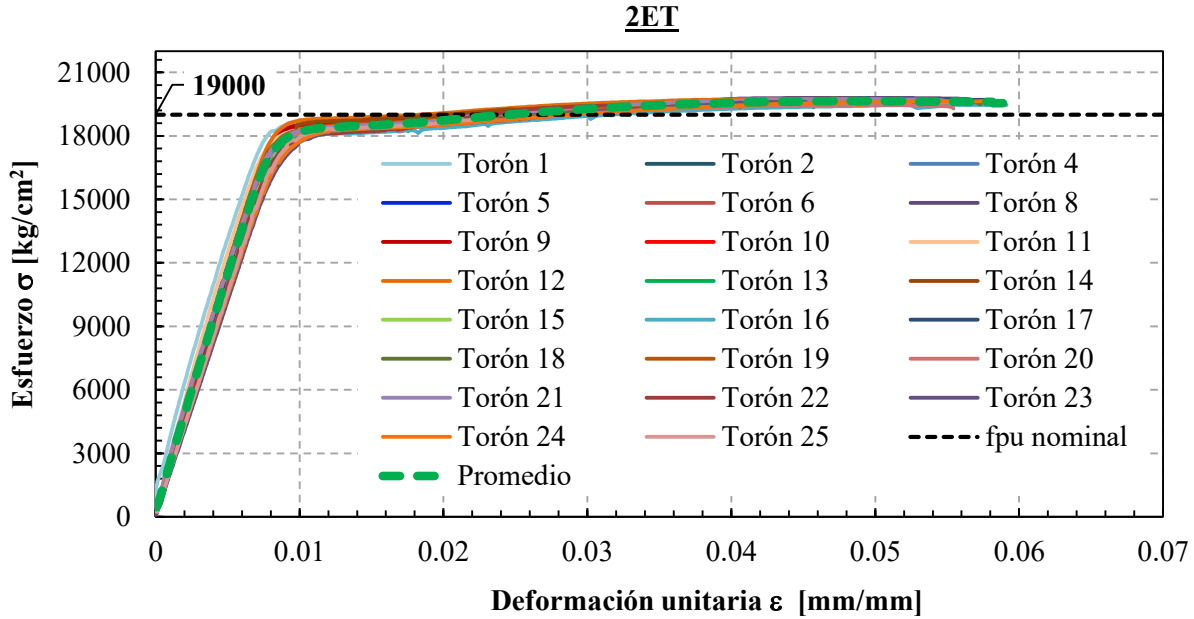


Figura 4.24 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el *strain gage* (2ET)

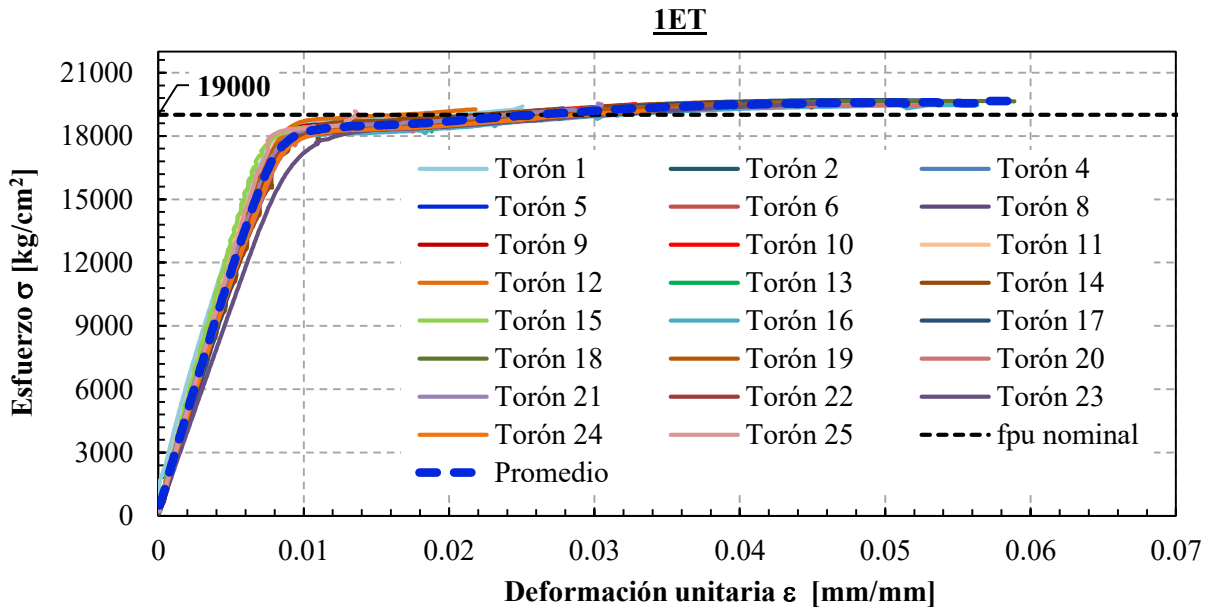
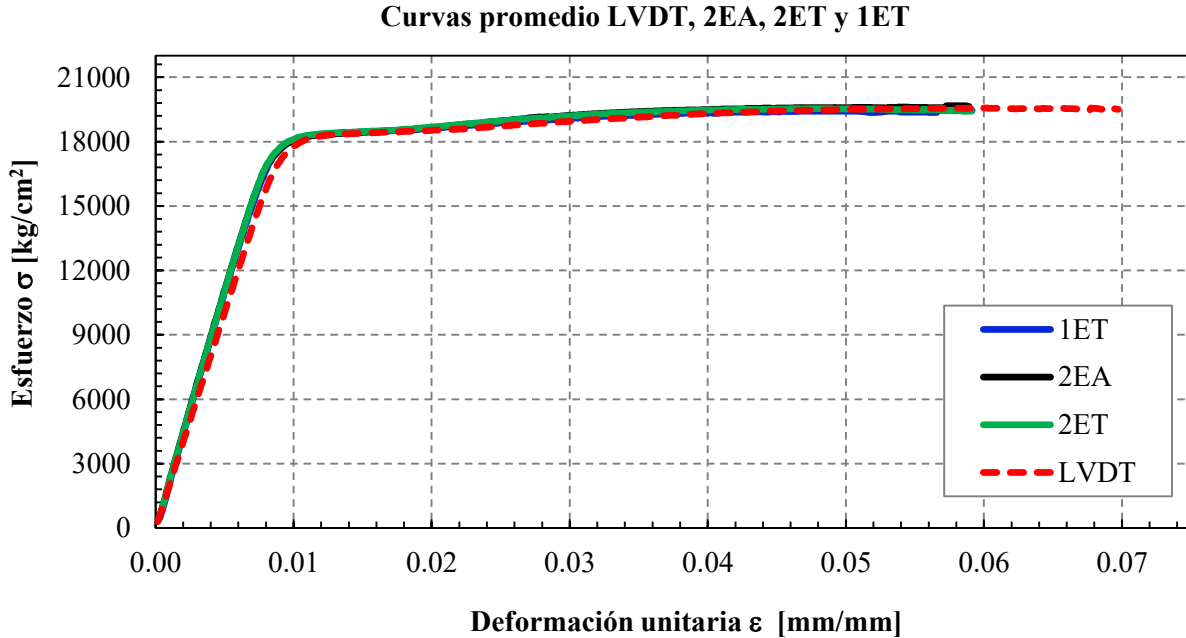


Figura 4.25 Curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el *strain gage* (1ET)

En muchos casos, los deformímetros dejaron de registrar deformaciones unitarias antes de llegar a la resistencia de ruptura. Por esta razón, la deformación unitaria última para los tres casos resulta ser menor que la obtenida con el transductor como se aprecia en la figura 4.26, en donde se superpusieron todas las curvas promedio.



**Figura 4.26 Curvas esfuerzo-deformación promedio**

#### 4.4 COMENTARIOS

En este capítulo se realizaron 25 pruebas de tensión de especímenes de presfuerzo. Para el caso del LVDT fueron útiles los datos de sólo 19 de ellas, dado que, en tres pruebas se presentó deslizamiento en los puntos de sujeción y, en tres más, se tuvieron datos de medición incompletos por parte del LVDT. En lo que respecta a los *strain gages* (2EA, 2ET y 1ET), los tres especímenes que se deslizaron también fueron excluidos quedando útiles únicamente los datos de 22 pruebas.

Se aplicó el criterio estadístico de Chauvenet para verificar la posible existencia de datos anómalos o raros en los resultados de las pruebas y, a través de éstos, se determinó si las pruebas eran o no descartadas. En el análisis se utilizó como parámetro de evaluación el esfuerzo de ruptura. Sin embargo, debido a la poca variación que tuvieron sus magnitudes, no fue necesario eliminar ninguna prueba.

Posteriormente, para todos los especímenes se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación, así como las curvas promedio para los cuatro dispositivos de medición (LVDT, 2EA, 2ET y 1ET). Estas últimas, en los próximos capítulos se identifican como curvas promedio experimentales.

Es importante para los fines de esta investigación poder relacionar con la mayor precisión posible las mediciones de deformaciones unitarias en los torones con los esfuerzos correspondientes, bajo distintas condiciones de carga. Se considera que las curvas esfuerzo-deformación del acero de presfuerzo, obtenidas como se ha presentado en este capítulo, permiten lograr este objetivo. En el capítulo 6 se describen las actividades realizadas para medir las deformaciones unitarias.

## **4.5 REFERENCIAS**

1. Aalami, B O (2014), “Post-Tensioned Buildings Design and Construction”, 1st Edition, PT-Structures.
2. ASTM A370 (2011), “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”, Annex A7. American Society for Testing and Materials (ASTM).
3. ASTM A416/A416M (2016), “Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete”, American Society for Testing and Materials (ASTM).
4. Espejo, E y JC Martínez (2007), “Caracterización de modos de falla típicos en cables de transmisión mecánica”, Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 27, No. 1, pp. 77-83.
5. Hibbeler, R C (2011), Mechanics of Materials, 8th Edition, Prentice Hall.
6. Hill, A T (2006), “Material properties of the grade 300 and grade 270 prestressing strands and their impact on the design of bridges”, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
7. Kent, H P (1985), “Testing 7-Wire Strand for Prestressed Concrete- The state of art”, PCI Journal, Vol. 30, No. 3, pp. 134-155.
8. Loflin, B J (2008), “Bond and material properties of grade 270 and grade 300 prestressing strands”, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
9. NMX-B-172 (1988), “Métodos de prueba mecánicos para productos de Acero”, Secretaría de comercio y fomento industrial, Dirección general de normas, NMX-B-172-1988.
10. NMX-B-292-CANACERO (2011), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria Siderúrgica. “Torón de siete alambres sin recubrimiento con relevado de esfuerzos para concreto presforzado-especificaciones y métodos de prueba”, NMX-B-292-CANACERO-2011.
11. PCI Design Handbook (2004), 6th Edition, Precast / Prestressed Concrete Institute.
12. Reinoso, E, M Rodríguez y R Betancourt (2000), “Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas”, ANIPPAC. México.
13. Rodríguez, M E y J C Botero (1997), “Evaluación del comportamiento de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles incluyendo pandeo”, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 56, pp. 9-27.
14. Taylor, J R (1997), An Introduction to Error Analysis: The Statistical Study of Uncertainties in Physical Measurements, 2nd Edition, University Science Books, Sausalito, California.

## CAPÍTULO 5: MODELO CONSTITUTIVO PROPUESTO

### 5.1 INTRODUCCIÓN

Para que en los análisis mecánicos de componentes estructurales sea posible predecir el comportamiento de los materiales, se requiere de modelos constitutivos que relacionen los estados de esfuerzo y deformación (Runesson 2006). Dichos modelos, también son conocidos como curvas esfuerzo-deformación.

Aprovechando la información experimental recopilada en este trabajo, y haciendo uso de formulaciones analíticas, se propone un modelo constitutivo del acero de presfuerzo que es útil para el diseño de elementos presforzados que utilicen el mismo tipo de torón que se considera en este trabajo. Para su formulación, se utilizaron los resultados obtenidos con el transductor de desplazamiento en el capítulo 4, ya que éstos se consideran representativos del torón y no de los alambres helicoidales como sucede con los resultados de los *strain gages*.

En la normatividad mexicana se proporcionan gráficamente algunos modelos del acero de presfuerzo, pero no las ecuaciones para obtenerlos. En la figura 5.1 se muestran las curvas que contiene el manual ANIPPAC (2000) para tres torones de distinto diámetro considerando aceros de normal y baja relajación.

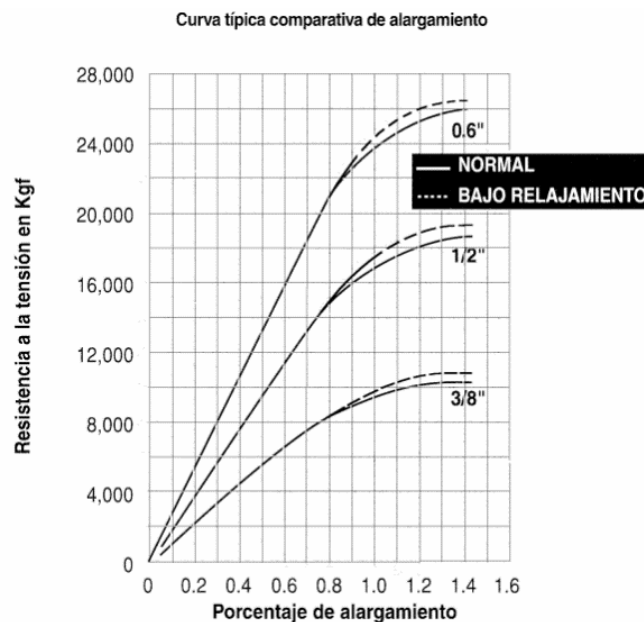
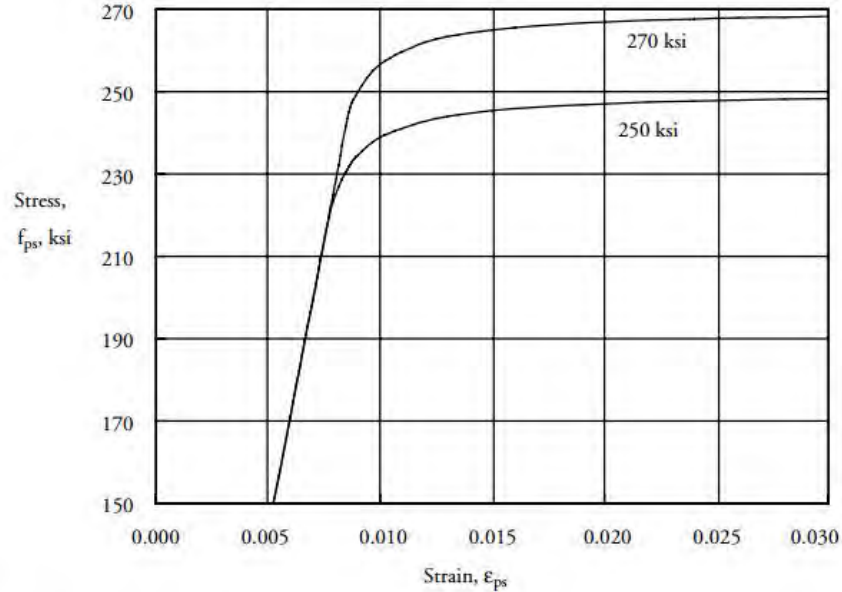


Figura 5.1 Curva fuerza- deformación para tres torones de distinto diámetro  
(ANIPPAC 2000)

Por el contrario, existe reglamentación internacional en donde sí se proporcionan las ecuaciones, como es el caso del Instituto del Concreto Prefabricado y Presforzado (PCI, por sus siglas en inglés), cuyos modelos para acero de presfuerzo de baja relajación de dos esfuerzos de ruptura (270 y 250 ksi) se muestran en la figura 5.2.



These curves can be approximated by the following equations:

250 ksi strand

For  $\epsilon_{ps} \leq 0.0076$ :  $f_{ps} = 28,500 \epsilon_{ps}$  (ksi)

For  $\epsilon_{ps} > 0.0076$ :  $f_{ps} = 250 - 0.04/(\epsilon_{ps} - 0.0064)$ (ksi)

270 ksi strand

For  $\epsilon_{ps} \leq 0.0086$ :  $f_{ps} = 28,500 \epsilon_{ps}$  (ksi)

For  $\epsilon_{ps} > 0.0086$ :  $f_{ps} = 270 - 0.04/(\epsilon_{ps} - 0.007)$ (ksi)

**Figura 5.2 Curva esfuerzo-deformación idealizada para acero de presfuerzo de siete alambres de baja relajación (PCI 2004)**

## 5.2 ANTECEDENTES

Como antecedente en la determinación de modelos constitutivos para acero de presfuerzo, se tiene la fórmula generalizada inicialmente propuesta por Skogman *et al.* (1988) y, posteriormente, mejorada por Devalapura y Tadros (1992) denominada como la fórmula de la potencia (*power formula*), la cual, mediante distintas variables, tales como: el módulo de elasticidad, el esfuerzo de fluencia y otras constantes, calcula con buena aproximación el esfuerzo de tensión del acero de presfuerzo para una determinada magnitud de deformación unitaria. Posteriormente, Loflin (2008) aplicó la fórmula a sus resultados experimentales para representar el modelo constitutivo de distintos tipos de torones de presfuerzo obteniendo buenos resultados.

Devalapura y Tadros (1992) hicieron un análisis refinado y obtuvieron constantes para simplificar la aplicación de la fórmula en: 1) torones, 2) alambres y 3) barras de acero de presfuerzo de baja relajación con distintos esfuerzos de ruptura. Estos autores representaron la fórmula de la potencia como se muestra en la ecuación 5.1.



$$f_{ps} = \varepsilon_{ps} \left[ A + \frac{B}{(1 + (C\varepsilon_{ps})^D)^{1/D}} \right] \quad (5.1)$$

donde

$f_{ps}$     esfuerzo de tensión en el torón de presfuerzo ( $\text{kg/cm}^2$ )

$\varepsilon_{ps}$     deformación unitaria en el torón de presfuerzo ( $\text{mm/mm}$ )

A, B, C y D    constantes

En su trabajo, los autores obtuvieron magnitudes para las constantes A, B, C y D, en función del esfuerzo de ruptura, para los tres tipos de elementos de presfuerzo evaluados (tabla 5.1).

**Tabla 5.1 Constantes de la fórmula de la potencia para distintos tipos de acero  
(adaptada de Devalapura y Tadros 1992)**

Tipo de acero	$f_{py}/f_{pu}$	A	B	C	D
270 ksi torón	0.90	887	27613	112.40	7.360
	0.85	756	27244	117.30	6.598
250 ksi torón	0.90	384	27616	119.70	6.430
	0.85	689	27311	126.70	5.305
250 ksi alambre	0.90	435	28565	125.10	6.351
	0.85	734	28266	132.50	5.256
235 ksi alambre	0.90	403	28597	133.10	5.463
	0.85	682	28318	141.00	4.612
150 ksi barra	0.85	467	28533	225.20	4.991
	0.80	629	28371	239.30	4.224

A continuación, se describe el procedimiento que Devalapura y Tadros (1992) utilizaron para la definición de las constantes, tomando como referencia la figura 5.3 que ilustra la curva esfuerzo-deformación típica para el acero de presfuerzo considerada en la fórmula.

1. Se determina el módulo de elasticidad del acero de presfuerzo, E.
2. Se proyectan las dos partes lineales de la curva esfuerzo-deformación. En caso de que la parte superior de la curva no sea una recta, se debe hacer una correlación para generar una recta. La magnitud de  $f_{so}$  corresponde al esfuerzo obtenido en el punto de intersección de estas dos rectas. En caso de no tener la curva completa, los autores recomiendan tomar  $f_{so} = 1.04 f_{py}$ .
3. Se calcula la constante C utilizando la relación:

$$C = \frac{E}{f_{so}} \quad (5.2)$$

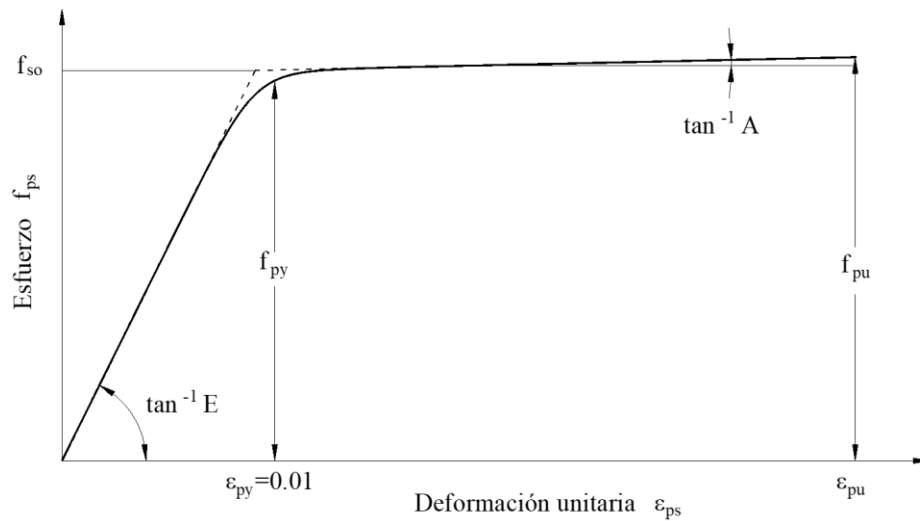
4. Se determina la constante A con la ecuación:

$$A = E \left( \frac{f_{pu} - f_{so}}{\varepsilon_{pu} E - f_{so}} \right) \quad (5.3)$$

5. Se calcula la constante B como:

$$B = E - A \quad (5.4)$$

6. Finalmente, la constante D se determina resolviendo la ecuación de la potencia (ec. 5.1) con el esfuerzo  $f_{ps}=f_{py}$ , y la deformación unitaria  $\varepsilon_{ps}=\varepsilon_{py}$ . Para ello, se realiza un proceso iterativo.



**Figura 5.3 Curva esfuerzo-deformación típica del acero de presfuerzo considerada en la fórmula de la potencia (adaptada de Devalapura y Tadros 1992)**

### 5.3 APLICACIÓN DE LA FÓRMULA DE LA POTENCIA

Con el propósito de visualizar el ajuste logrado entre la curva analítica y la curva promedio experimental, se aplicó la fórmula de la potencia a los resultados obtenidos con el LVDT. A continuación, se presenta el cálculo realizado.

1. Módulo de elasticidad:  $E = 2,002,881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
2. Esfuerzo de ruptura:  $f_{pu} = 19483 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
3. Deformación unitaria última:  $\varepsilon_{pu} = 0.06 \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$

4. Haciendo la proyección de las rectas como se señala en el inciso 2 de la sección 5.2, se tiene que  $f_{so} = 18200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ . La constante A se calculó con la ec. 5.3.

$$A = 2,002,881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \left( \frac{19483 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 18200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{0.06 \cdot 2,002,881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 18200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) = 25200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

5. Para la constante B, se utilizó la ec. 5.4.

$$B = (E - A) = (2,002,881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 25200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}) = 1,977,681 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

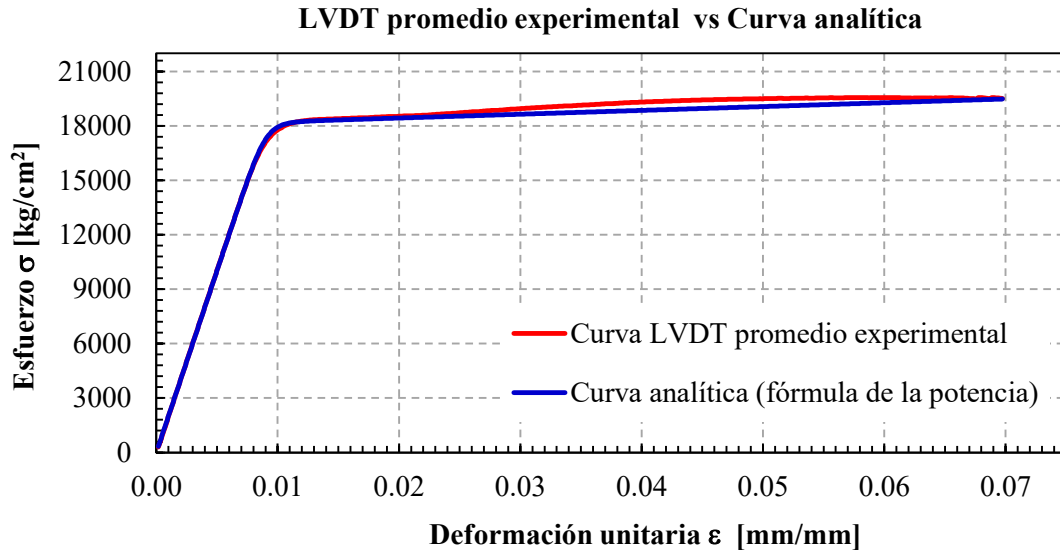
6. C se calculó con la ec. 5.2 como:

$$C = \frac{2,002,881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{18200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 110 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

7. Finalmente, se calculó D como se indica en el inciso 6 de la sección 5.2.

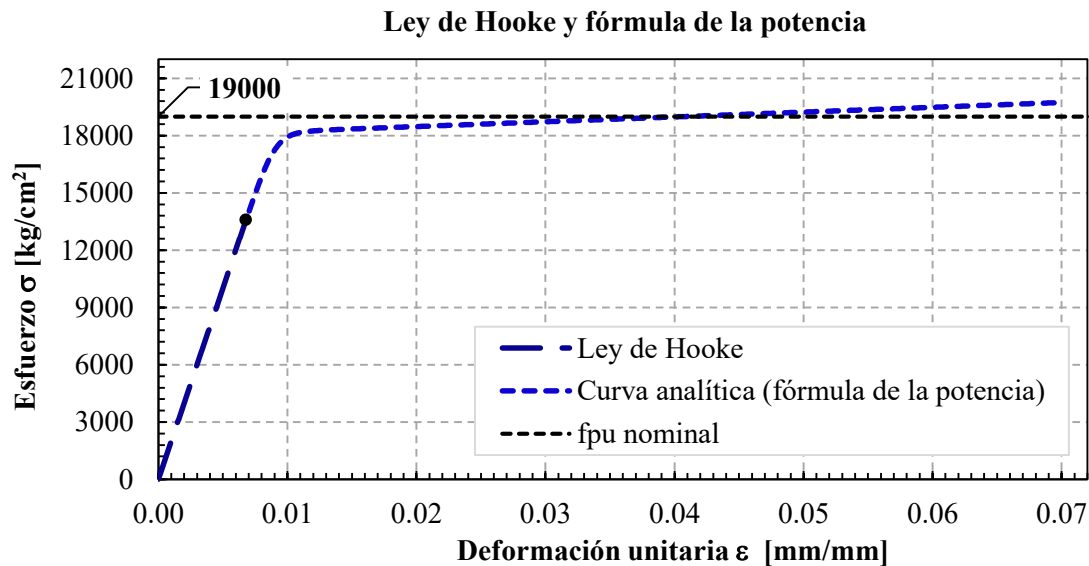
$$D = 14 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Al sobreponer la curva promedio experimental y la curva analítica se observa que presentan bastante similitud en el intervalo lineal, después de éste, se pierde ligeramente la aproximación haciéndose más notable a partir de una deformación unitaria de 0.02 mm/mm (figura 5.4). Hasta dicha magnitud, se considera que la fórmula de la potencia representa bien a la curva promedio experimental. Por ello, se tomó en cuenta parte de su curva para la definición del modelo constitutivo.



**Figura 5.4 Comparación de curvas esfuerzo-deformación experimental y analítica**

Aunque la curva analítica mostró buena aproximación en el intervalo lineal, en el modelo constitutivo este intervalo se determinó a partir de la ley de Hooke (figura 5.5).



**Figura 5.5 Integración de la ley de Hooke y la fórmula de la potencia en el modelo constitutivo propuesto**

Como se observa en la figura 5.5, al final de la curva analítica se excede el esfuerzo nominal (19000  $\text{kg/cm}^2$ ) que establecen las normas para el acero de presfuerzo. Sin embargo, en el modelo propuesto en ningún instante debía excederse dicha magnitud, tal y como sucede con el modelo del PCI (2004). Por esta razón, una parte de su intervalo no lineal se definió utilizando una función racional como se describe en la siguiente sección.

## 5.4 FUNCIÓN RACIONAL

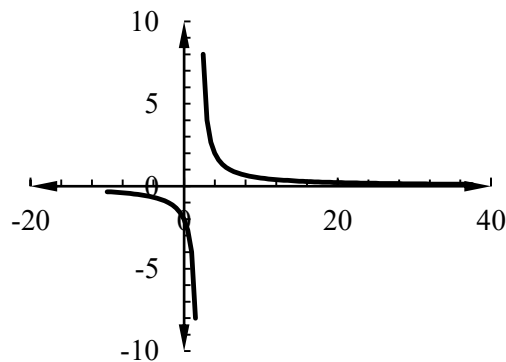
De acuerdo con Zill y Wright (2011), una función racional  $y=f(x)$  es una función de la forma:

$$f(x) = \frac{p(x)}{q(x)} \quad (5.5)$$

Donde  $p$  y  $q$  son funciones polinomiales. Por ejemplo, la función:

$$y = \frac{4}{x-2} \quad (5.6)$$

Al graficarla, se obtiene la figura 5.6.

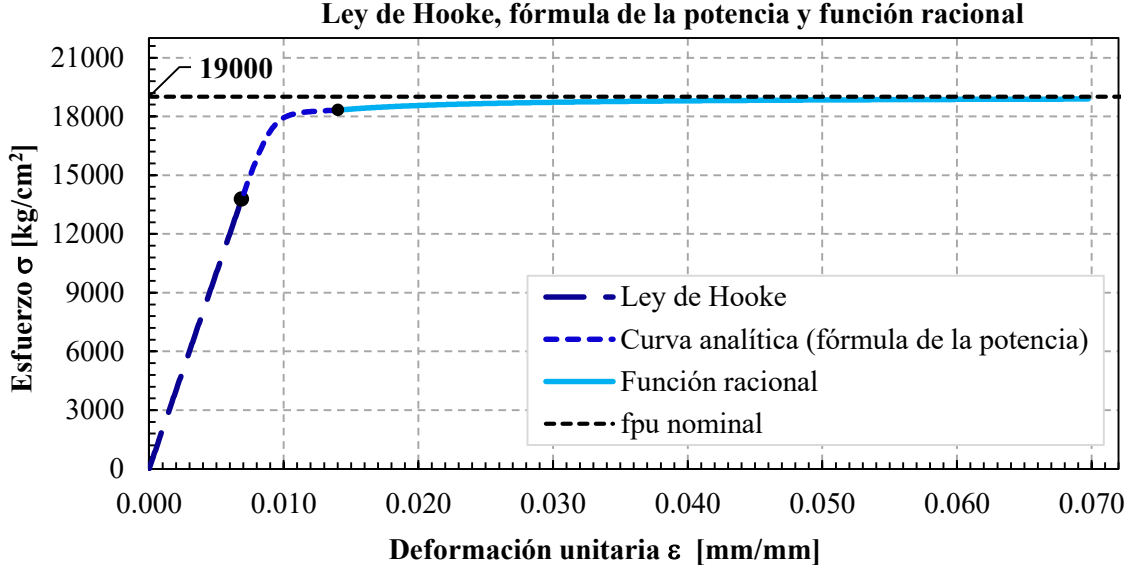


**Figura 5.6 Curvas de la función racional  $y=4/(x-2)$**

Para determinar la función, se tomó en cuenta que su curva: 1) tuviera un esfuerzo ligeramente menor que el nominal en una deformación unitaria de 0.07 mm/mm, 2) se superpusiera con la curva experimental, por lo menos, hasta una deformación unitaria de 0.025 mm/mm y, 3) coincidiera con la curva analítica en una deformación unitaria de 0.014 mm/mm. Finalmente, esto se hizo restando al esfuerzo nominal la función racional que se muestra en la ecuación 5.7.

$$\frac{7.5}{\varepsilon_{ps} - 0.003} \quad (5.7)$$

Por último, en la figura 5.7 se muestra la curva esfuerzo-deformación que integra: la ley de Hooke, la fórmula de la potencia y la función racional, que corresponde al modelo constitutivo propuesto.



**Figura 5.7 Integración de la ley de Hooke, la fórmula de la potencia y la función racional en el modelo constitutivo propuesto**

### 5.5 MODELO CONSTITUTIVO PROPUESTO A PARTIR DEL LVDT

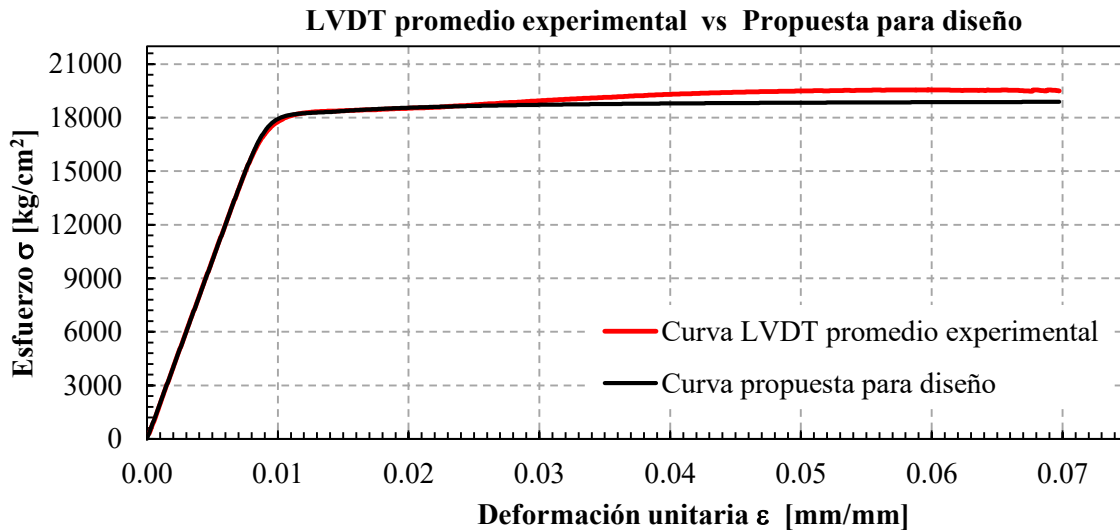
Finalmente, se tiene que los esfuerzos  $f_{ps}$  que definen el modelo constitutivo propuesto para fines de diseño de elementos presforzados adquieren la forma paramétrica de la ecuación 5.7:

$$f_{ps}(\epsilon_{ps}) = \begin{cases} E \cdot \epsilon_{ps} & \text{si } \epsilon_{ps} \leq 0.007 \\ \epsilon_{ps} \left[ 25200 + \frac{1,977,681}{[1 + (110 \cdot \epsilon_{ps})^{14}]^{1/14}} \right] & \text{si } 0.007 > \epsilon_{ps} \leq 0.014 \\ 19000 - \frac{7.5}{\epsilon_{ps} - 0.003} & \text{si } 0.014 > \epsilon_{ps} \leq 0.07 \end{cases} \quad (5.8)$$

La propuesta está constituida por tres ramas: la primera corresponde a la parte lineal obedeciendo a la ley de Hooke, la segunda está definida por la ecuación de la potencia que inicia en el límite de proporcionalidad y termina un poco después de la fluencia y, finalmente, la tercera está determinada por una función racional, completando así la definición de la curva.

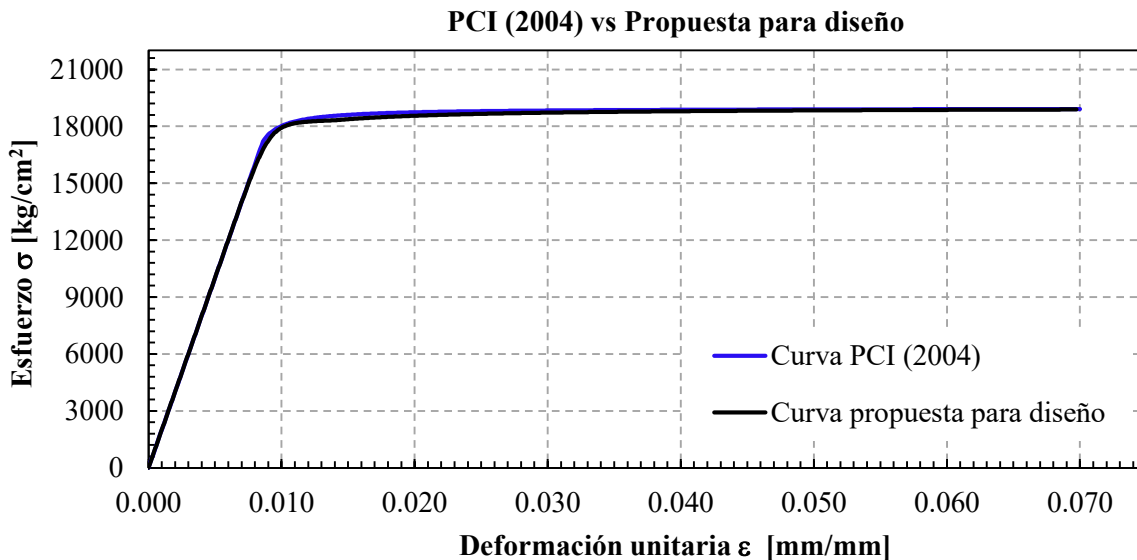
En la figura 5.8 se sobrepuso la curva que resulta de la ecuación propuesta con la curva promedio obtenida experimentalmente, en donde se observa la diferencia de resistencias después de una deformación unitaria aproximada de 0.025 mm/mm. Esto es razonable debido a que, como se comentó, el modelo propuesto está acotado bajo un criterio conservador para que en ningún

instante se exceda el esfuerzo nominal, y en la curva experimental se tuvo un esfuerzo de ruptura superior (figura 5.8).



**Figura 5.8 Comparación de la curva promedio experimental y la curva propuesta**

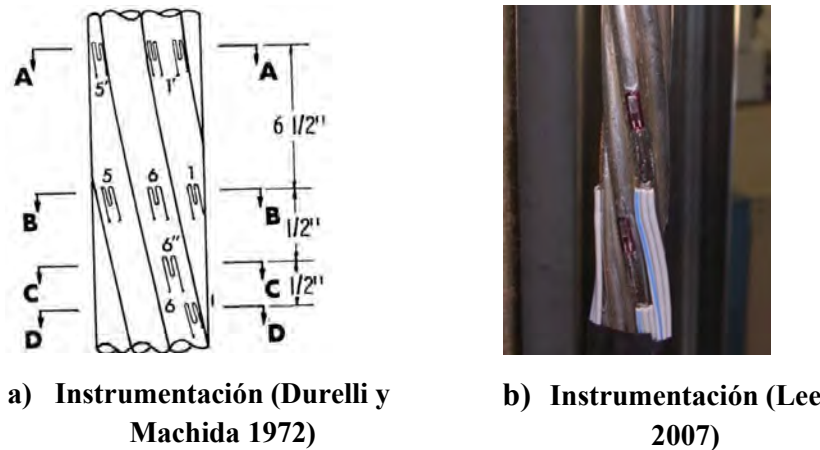
Por otro lado, en la figura 5.9 se ilustra la comparación entre la curva propuesta y la recomendada por el PCI (2004), en donde se aprecia que en la parte lineal ambas tienen buena aproximación. Sin embargo, a partir del punto de proporcionalidad se separan un poco, siendo ligeramente mayores las resistencias obtenidas con la ecuación del PCI (2004). A partir de una deformación unitaria aproximada de 0.04 mm/mm, nuevamente, ambas curvas se sobreponen hasta su final.



**Figura 5.9 Comparación de la curva PCI (2004) y la curva propuesta**

## 5.6 ECUACIONES PARA REPRODUCIR LAS CURVAS EXPERIMENTALES

Con distintos propósitos, en trabajos anteriores ya se han instrumentado torones de presfuerzo con *strain gages*. Por ejemplo, Durelli y Machida (1972) midieron deformaciones unitarias en torones de presfuerzo con estos dispositivos para desarrollar su teoría de esfuerzos y deformaciones (figura 5.10a). Por su parte, Lee (2007) también lo hizo pero con el propósito de calcular módulos de elasticidad (figura 5.10b). Sin embargo, debido a las magnitudes reducidas de tensión que utilizaron, en ninguno de estos trabajos se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación completas utilizando estos deformímetros.



**Figura 5.10 Instrumentación de torones con *strain gages* en investigaciones anteriores**

Por esta razón, se considera que las curvas experimentales obtenidas en este trabajo, tanto con los *strain gages* como con el LVDT, pueden ser de utilidad en investigaciones futuras en donde se evalúen distintas condiciones mecánicas del presfuerzo. Bajo esta consideración, se proporcionan ecuaciones que permiten reproducir las curvas completas.

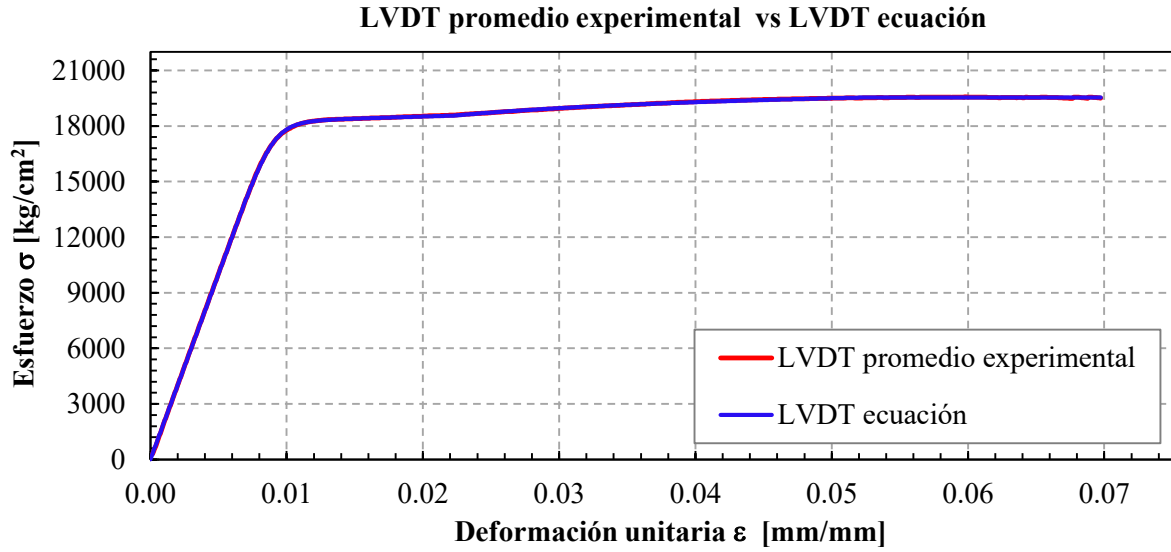
Con el propósito de considerar la fórmula de la potencia en las ecuaciones que reproducen las curvas experimentales, se utilizaron factores de ajuste en las ecuaciones que definen las constantes A, B y D. Estos factores se determinaron de forma arbitraria por medio de una hoja de cálculo hasta lograr que las curvas analíticas y experimentales prácticamente se superpusieran.

Finalmente, para el caso del LVDT se tiene la ecuación:



$$f_{ps}(\epsilon_{ps}) = \begin{cases} E \cdot \epsilon_{ps} & \text{si } \epsilon_{ps} \leq 0.007 \\ \epsilon_{ps} \left[ 21889 + \frac{1988916}{[1 + (110 \cdot \epsilon_{ps})^{11}]^{\frac{1}{11}}} \right] & \text{si } 0.007 > \epsilon_{ps} \leq 0.022 \\ 20500 - \frac{11550}{200 \cdot \epsilon_{ps} + 1.5} & \text{si } 0.022 > \epsilon_{ps} \leq 0.052 \\ \left[ 19700 - \frac{20}{-\epsilon_{ps} - 0.085} \right] - 300 & \text{si } 0.052 > \epsilon_{ps} \leq 0.07 \end{cases} \quad (5.9)$$

La comparación de las curvas analítica y experimental se muestra en la figura 5.11.



**Figura 5.11 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto de la ecuación del LVDT**

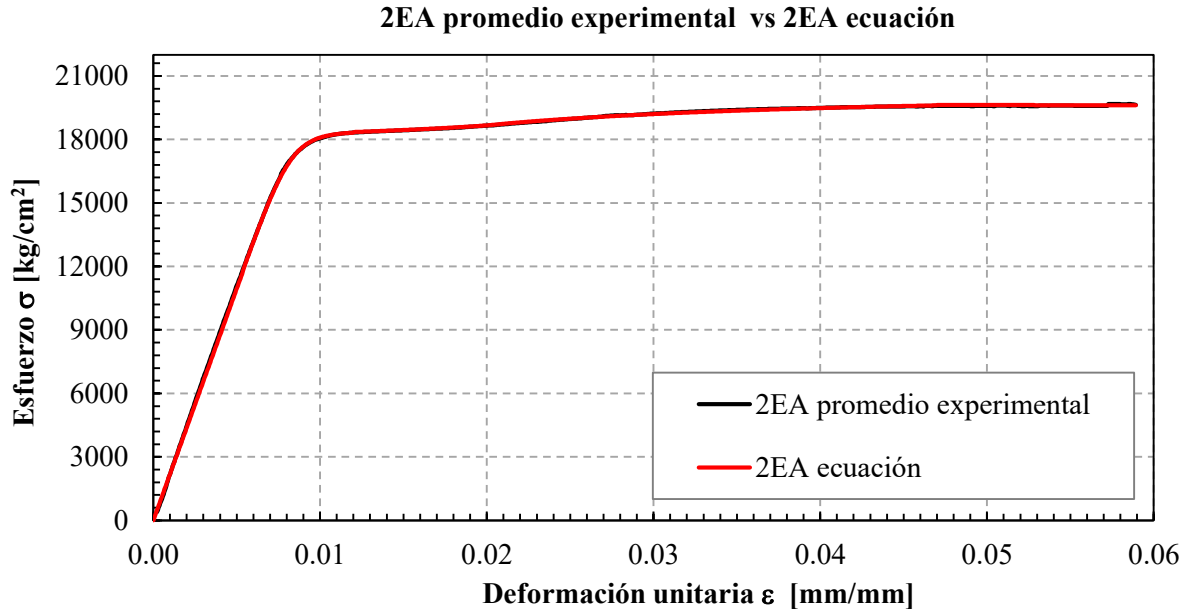
Asimismo, se obtuvieron las ecuaciones 5.10 a 5.12 que permiten reproducir las curvas de los *strain gages* 2EA, 2ET, y 1ET, respectivamente.

$$f_{ps}(\epsilon_{ps}) = \begin{cases} E \cdot \epsilon_{ps} & \text{si } \epsilon_{ps} \leq 0.0054 \\ \epsilon_{ps} \left[ 2904 + \frac{2198150}{[1 + (120 \cdot \epsilon_{ps})^{10}]^{\frac{1}{10}}} \right] & \text{si } 0.0054 > \epsilon_{ps} \leq 0.012 \\ 17532 - \left( \frac{-5900}{-250 \cdot \epsilon_{ps} + 10.20} \right) & \text{si } 0.012 > \epsilon_{ps} \leq 0.02 \\ 20400 - \left( \frac{8150}{210 \cdot \epsilon_{ps} + 0.5} \right) & \text{si } 0.02 > \epsilon_{ps} \leq 0.047 \\ \left[ 19700 - \left( \frac{0.5}{-\epsilon_{ps} + 0.085} \right) \right] - 60 & \text{si } 0.047 > \epsilon_{ps} \leq 0.06 \end{cases} \quad (5.10)$$

$$f_{ps}(\epsilon_{ps}) = \begin{cases} E \cdot \epsilon_{ps} & \text{si } \epsilon_{ps} \leq 0.00635 \\ \epsilon_{ps} \left[ 2709 + \frac{2211652}{[1 + (120 \cdot \epsilon_{ps})^{9.9}]^{\frac{1}{9.9}}} \right] & \text{si } 0.00635 > \epsilon_{ps} \leq 0.013 \\ 17532 - \left( \frac{-6100}{-230 \cdot \epsilon_{ps} + 10} \right) & \text{si } 0.013 > \epsilon_{ps} \leq 0.0194 \\ 20400 - \left( \frac{8150}{210 \cdot \epsilon_{ps} + 0.5} \right) & \text{si } 0.0194 > \epsilon_{ps} \leq 0.043 \\ \left[ 19700 - \left( \frac{4}{-\epsilon_{ps} + 0.08} \right) \right] - 60 & \text{si } 0.043 > \epsilon_{ps} \leq 0.06 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$f_{ps}(\epsilon_{ps}) = \begin{cases} E \cdot \epsilon_{ps} & \text{si } \epsilon_{ps} \leq 0.00635 \\ \epsilon_{ps} \left[ 2709 + \frac{2211652}{[1 + (120 \cdot \epsilon_{ps})^{9.9}]^{\frac{1}{9.9}}} \right] & \text{si } 0.00635 > \epsilon_{ps} \leq 0.013 \\ 17532 - \left( \frac{-6100}{-230 \cdot \epsilon_{ps} + 10} \right) & \text{si } 0.013 > \epsilon_{ps} \leq 0.0194 \\ 20400 - \left( \frac{8150}{210 \cdot \epsilon_{ps} + 0.5} \right) & \text{si } 0.0194 > \epsilon_{ps} \leq 0.043 \\ \left[ 19700 - \left( \frac{4}{-\epsilon_{ps} + 0.08} \right) \right] - 60 & \text{si } 0.043 > \epsilon_{ps} \leq 0.06 \end{cases} \quad (5.12)$$

Las curvas experimentales y las curvas analíticas que resultan de las ecuaciones, se comparan en las figuras 5.12 a 5.14.



**Figura 5.12 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del *strain gage* 2EA**

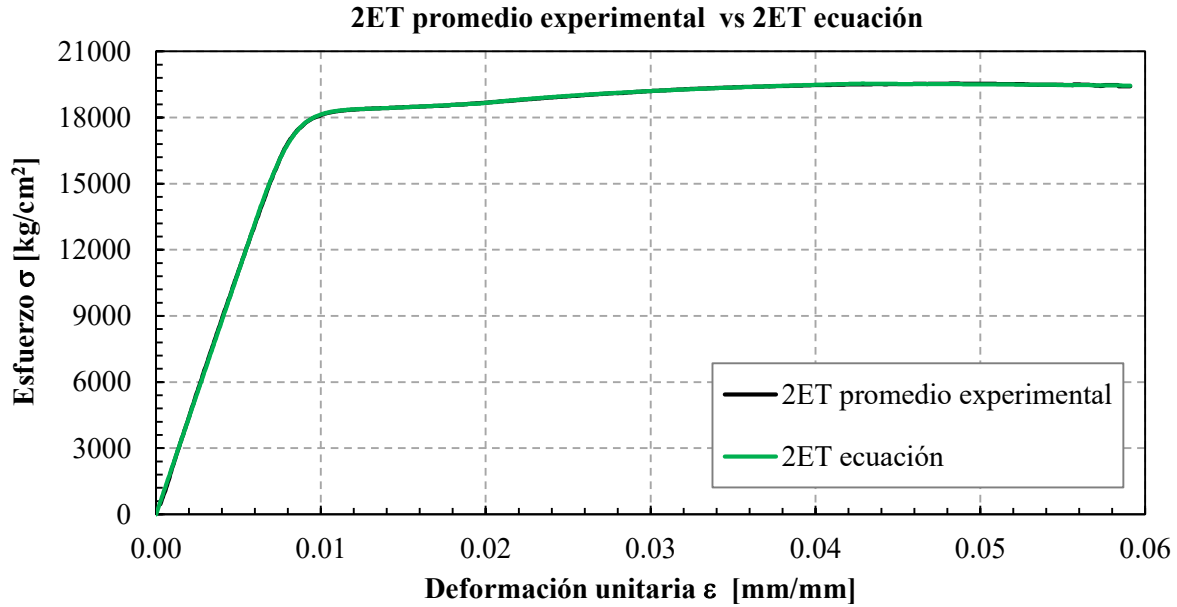


Figura 5.13 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del *strain gage* 2ET

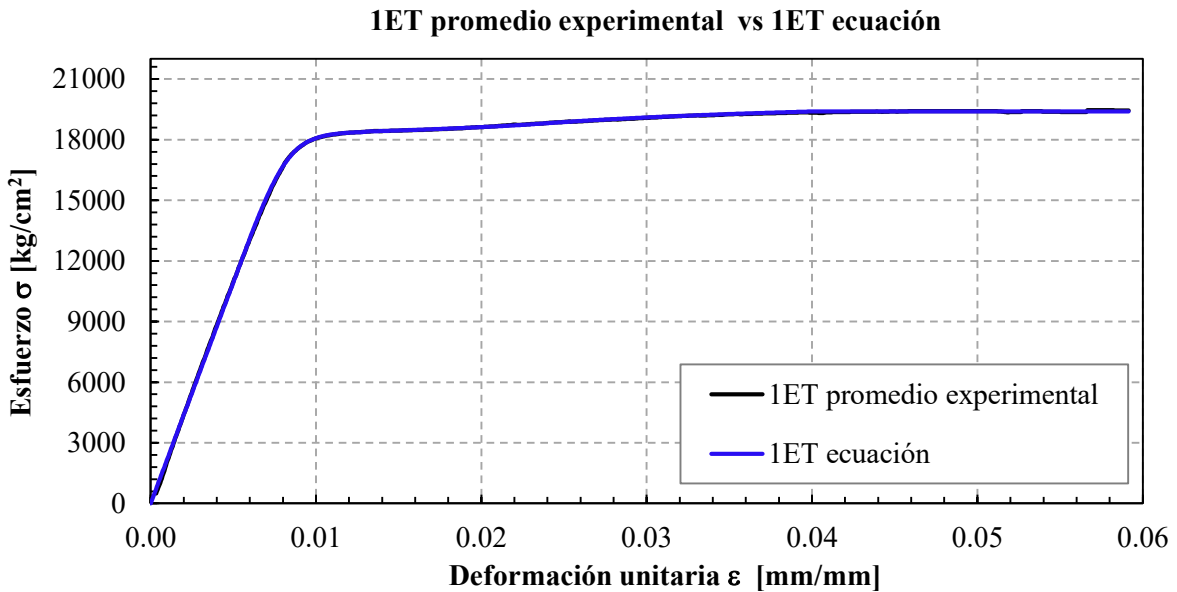


Figura 5.14 Comparación de la curva promedio experimental y la curva producto la ecuación del *strain gage* 1ET

## 5.7 COMENTARIOS

A partir de la curva esfuerzo-deformación promedio obtenida con el LVDT, que es representativa del torón, se propuso un modelo constitutivo del acero de presfuerzo, útil para el diseño de elementos de concreto presforzado que utilicen acero de las mismas características que el

considerado en este trabajo. En su formulación, se considera la contribución de: 1) la ley Hooke, 2) la fórmula de la potencia y 3) una función racional.

El modelo propuesto se comparó con el recomendado por el PCI (2004), en donde se apreció una buena correlación entre ambas curvas, principalmente en la parte lineal y en deformaciones unitarias superiores a 0.04 mm/mm para la parte no lineal.

Finalmente, se propusieron ecuaciones que permiten reproducir las curvas promedio experimentales para los cuatro dispositivos de medición utilizados.

## **5.8 REFERENCIAS**

1. Devalapura, R K y M K Tadros (1992), "Stress-Strain Modeling of 270 ksi Low Relaxation Prestressing Strands", PCI Journal, Vol. 37, No. 2, pp.100-105.
2. Durelli, A J, S Machida y C J Parks (1972), "Strains and Displacements on a Steel Wire Strand", Naval Engineers Journal, Vol. 84, No. 6, pp. 85-93.
3. Hibbeler, R C (2011), Mechanics of Materials, 8th Edition, Prentice Hall.
4. Lee, J K (2007), "Evaluation of External Post-Tensioned Tendons using Vibration Signatures", PhD thesis, University of Texas at Austin.
5. Loflin, B J (2008), "Bond and material properties of grade 270 and grade 300 prestressing strands", Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
6. NTCC (2004), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre, México.
7. PCI Design Handbook (2004), 6th Edition, Precast / Prestressed Concrete Institute.
8. Reinoso, E, M Rodríguez y R Betancourt (2000), "Manual de diseño de estructuras prefabricadas y presforzadas", ANIPPAC. México.
9. Runesson, K (2006), "Constitutive modeling of engineering materials - Theory and computation", Lecture Notes, Dept. of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg.
10. Skogman, C B, M K Tadros y R Grasmick (1988), "Flexural Strength of Prestressed Concrete Members", PCI Journal, Vol. 33, No. 5, pp. 96-123.
11. Zill, D G y W S Wright (2011), Cálculo: Trascendentes tempranas, 4ta Edición, McGRAW-HILL.

## **CAPÍTULO 6: ESTIMACIÓN DEL ESFUERZO EFECTIVO DE TORONES DE PRESFUERZO EN CAMPO**

### **6.1 INTRODUCCIÓN**

En el capítulo 4 se obtuvieron curvas esfuerzo-deformación de torones de presfuerzo utilizando distintos dispositivos de medición. Dando seguimiento al trabajo de investigación, en este capítulo se describen las actividades que consistieron en llevar a cabo pruebas en campo donde se midieron deformaciones unitarias en torones de presfuerzo sometidos a distintos esfuerzos de tensión. Las deformaciones unitarias medidas se relacionaron con las curvas esfuerzo-deformación obtenidas experimentalmente, para así estimar el esfuerzo efectivo en los especímenes de prueba. Los esfuerzos estimados se compararon con los esfuerzos conocidos a través del sistema de postensado con el que se controlaron los niveles de carga. Estos esfuerzos, se identificaron en este documento como esfuerzos de referencia, y en todos los casos fueron menores que el esfuerzo de fluencia del acero de presfuerzo. El objetivo de estos ensayos, fue determinar si los esfuerzos obtenidos con la medición de deformaciones unitarias, eran iguales o suficientemente aproximados a los de referencia.




Para lograr lo antes descrito, se realizaron una serie de pruebas en los modelos de ensaye contruidos previamente (TP-150, TP-250 y TP-300), cuya geometría permitió realizar las maniobras de instrumentación en las muestras de torón utilizando *strain gages* y transductores de desplazamiento. Considerando que se trata de modelos de ensaye postensados, antes de iniciar las pruebas se postensaron sus torones inferiores, los cuales quedaron tensos de forma permanente. Para ello, los modelos fueron contruidos con suficiente anticipación con el propósito de cumplir la condición que establece la normatividad, de tener por lo menos el 80% de la resistencia a compresión del concreto considerada en el diseño, al instante de aplicar el presfuerzo. Asimismo, los accesorios de los anclajes pasivo y activo fueron colocados durante la construcción de los modelos para la transferencia de esfuerzos por parte del gato monotorón hacia dichos anclajes.

Por último, se siguió un protocolo de pruebas estructurado de tal forma que permitió evaluar ciertos parámetros considerados como los más importantes en este trabajo, siendo: 1) la magnitud de la fuerza de tensado, 2) el tipo de destensado, 3) longitud óptima de instrumentación, 4) tipo de instrumentación y 5) cantidad de instrumentación. A todos ellos, se asignaron características cualitativas y cuantitativas razonables desde un punto de vista práctico, con el propósito de lograr que su aplicación sea viable en la evaluación de estructuras existentes en campo.

## 6.2 ANTECEDENTES

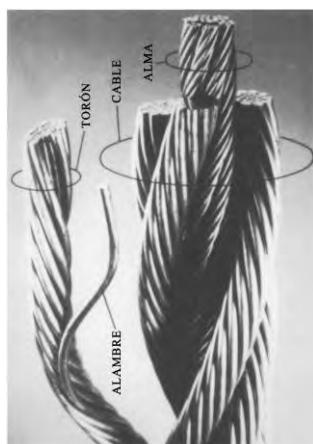
### 6.2.1 Teorías de esfuerzos y deformaciones en torones de siete alambres

De acuerdo con la empresa japonesa Sumitomo Electric Corp, los dos tipos de torones de presfuerzo que actualmente son utilizados en el gremio del presfuerzo están formados por 7 y 19 alambres, este último con dos distintos arreglos como se muestra en la figura 6.1. No obstante, el más empleado es el de 7 alambres, mismo que se utilizó en este trabajo. A este mismo fabricante hace referencia Naaman (2004), en la sección de tipos de torones de presfuerzo.

Tipo	Diámetro		Forma
	mm	in	
Torón de siete alambres no adherido	6.2 ~ 15.7	0.25 ~ 0.60	
Torón de diecinueve alambres no adherido	17.8 ~ 21.8	0.70 ~ 0.86	
	28.6	1.13	

**Figura 6.1 Diámetros y formas más comunes de torones de presfuerzo (adaptada de Sumitomo Electric Corp, Japón 2017)**

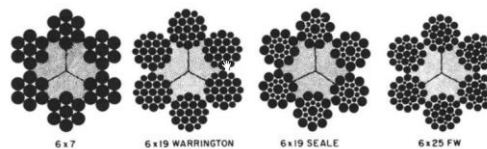
Por otra parte, como lo menciona Costello (1997) existen otros sectores como el eléctrico y el naval donde el uso de torones y cables es más variado, algunos de ellos se muestran en la figura 6.2.



**a) Cable de alambres**



**b) Tipos de trenzados comunes**



**c) Tipos de secciones transversales**

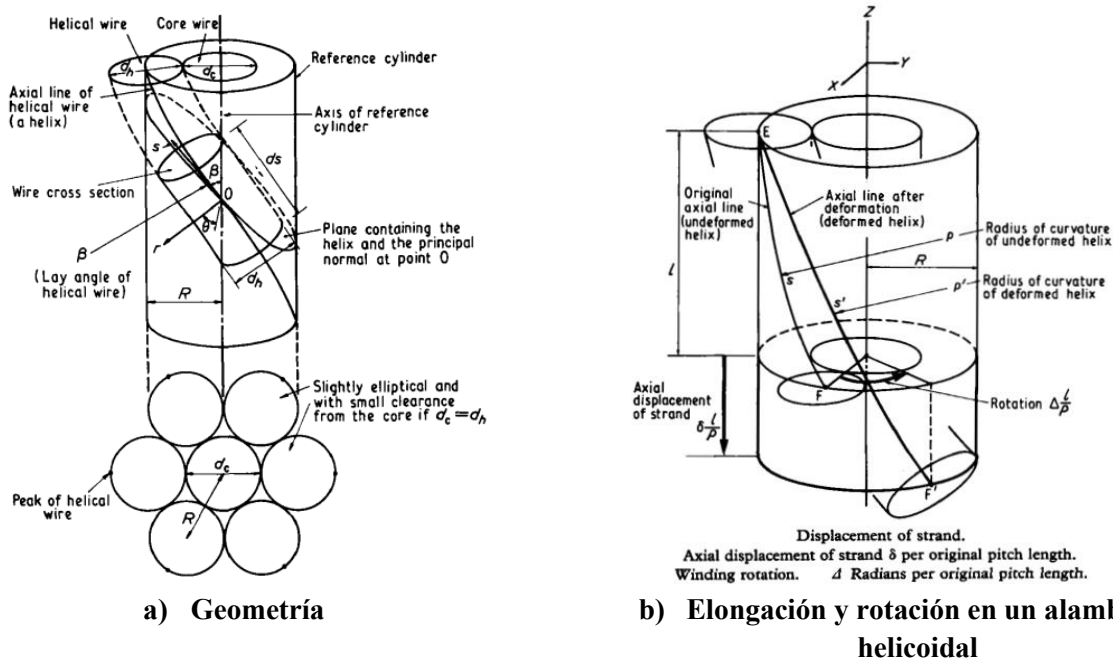
**Figura 6.2 Tipos de cables más comunes (adaptada de Costello 1997)**

Un problema que se presenta en torones formados por un alambre central y seis helicoidales, es que si se hace un corte perpendicular al eje longitudinal del torón central, las áreas de los torones helicoidales no son circulares y los esfuerzos perpendiculares al eje de los alambres helicoidales no son paralelos al eje del torón central. De acuerdo con la literatura consultada, el análisis de esfuerzos y deformaciones en este tipo de torón sujeto a deformaciones axiales y rotacionales, ha sido desarrollado principalmente en las áreas naval y mecánica. Entre los trabajos más completos se encuentran el de Machida y Durelli (1973) y Costello (1997). A continuación, se describe en que consistieron sus investigaciones.

### 6.2.1.1 Machida y Durelli (1973)

Estos autores recomiendan expresiones para determinar la fuerza axial, flexión y momento de torsión en los alambres helicoidales, y para el alambre central la fuerza axial y momento de torsión, de un torón de siete alambres sometido a desplazamientos axiales y de torsión.

Para ello, partieron de la suposición de que cada alambre helicoidal está en contacto con los dos alambres adyacentes, y con el central. Por lo tanto, se asume que las secciones de los alambres son circulares antes y después de deformarse. En la figura 6.3 se ilustra la geometría de torón en que basaron su análisis.



**Figura 6.3 Características geométricas del torón estudiado por Machida y Durelli (1973)**

Las cargas actuantes que consideraron son tensión axial, torsión y torsión combinada con tensión, que provocan elongación y rotación en el torón. El estado de esfuerzos y de deformación asociado con estas cargas, se consideró constante a lo largo del eje axial de cada alambre helicoidal debido a las restricciones geométricas.



De las principales variables que se muestran en la figura 6.3, se tiene que  $\rho$  es la longitud de paso,  $\beta$  el ángulo de la longitud de paso,  $d_c$  el diámetro del alambre central y  $d_h$  el diámetro del alambre helicoidal. La distancia  $R$  se calcula como:

$$R = \frac{d_c}{2} + \frac{d_h}{2} \quad (6.1)$$

y  $\beta$  se calcula con la ecuación:

$$\tan \beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\rho} \quad (6.2)$$

Del análisis de fuerzas en el alambre helicoidal asociadas con el desplazamiento axial y torsional aplicado al torón, y asumiendo que las deformaciones rotacionales son muy pequeñas, es decir,  $\gamma \ll 1$ . Se tiene que las ecuaciones que relacionan la fuerza axial actuando en un alambre helicoidal están dadas por las ecuaciones:

$$\varepsilon_s^{ah} = \varepsilon \cos^2 \beta + \gamma \sin^2 \beta \quad (6.3)$$

$$\sigma_s^{ah} = E(\varepsilon \cos^2 \beta + \gamma \sin^2 \beta) \quad (6.4)$$

$$N_h = A_h E(\varepsilon \cos^2 \beta + \gamma \sin^2 \beta) \quad (6.5)$$

donde

$\varepsilon_s^{ah}$  deformación unitaria en el alambre helicoidal

$\varepsilon$  deformación unitaria en el alambre central

$\gamma$  rotación normalizada

$\sigma_s^{ah}$  esfuerzo normal correspondiente a  $\varepsilon_s^{ah}$

$N_h$  fuerza axial actuando en el alambre helicoidal

$A_h$  área de la sección transversal del alambre helicoidal

$E$  módulo de elasticidad

En cuanto a las fuerzas en el alambre central asociadas con el desplazamiento axial y torsional aplicado al torón, se tiene que:

$$\varepsilon_z^{ac} = \varepsilon \quad (6.6)$$

$$\sigma_z^{ac} = E\varepsilon \quad (6.7)$$

$$N_c = A_c E \varepsilon \quad (6.8)$$

donde

$\varepsilon_z^{ac}$  deformación unitaria en el alambre central

$\sigma_z^{ac}$  esfuerzo normal correspondiente a  $\varepsilon_z^{ac}$

$N_c$  fuerza axial actuando en el alambre central

Finalmente, las fuerzas en el torón asociadas con el desplazamiento axial y torsional aplicado se calculan como:

$$N = A\varepsilon + B\gamma \quad (6.9)$$

$$T = C\varepsilon + D\gamma \quad (6.10)$$

donde A, B, C y D son constantes determinadas por la geometría del torón y las constantes elásticas del material, y se obtienen con las ecuaciones:

$$A = A_c E + 6A_h E \cos^3 \beta \quad (6.11)$$

$$B = 6A_h E \sin^2 \beta \cos 4\beta \quad (6.12)$$

$$C = 6A_h R E \sin \beta \cos^2 \beta - \frac{3GI_p^h \sin 4\beta \cos \beta}{2R} - \frac{12EI \cos^2 \beta \sin^3 \beta}{R} \quad (6.13)$$

$$D = 6A_h R E \sin^3 \beta + \frac{3GI_p^h \sin 4\beta \cos \beta}{2R} + \frac{12EI \cos^2 \beta \sin^3 \beta}{R} + \frac{2\pi GI_p^c}{\rho} \quad (6.14)$$

donde

G módulo de corte

I momento de inercia de la sección transversal del alambre helicoidal

$I_p^h$  momento polar del alambre helicoidal

$I_p^c$  momento polar del alambre central

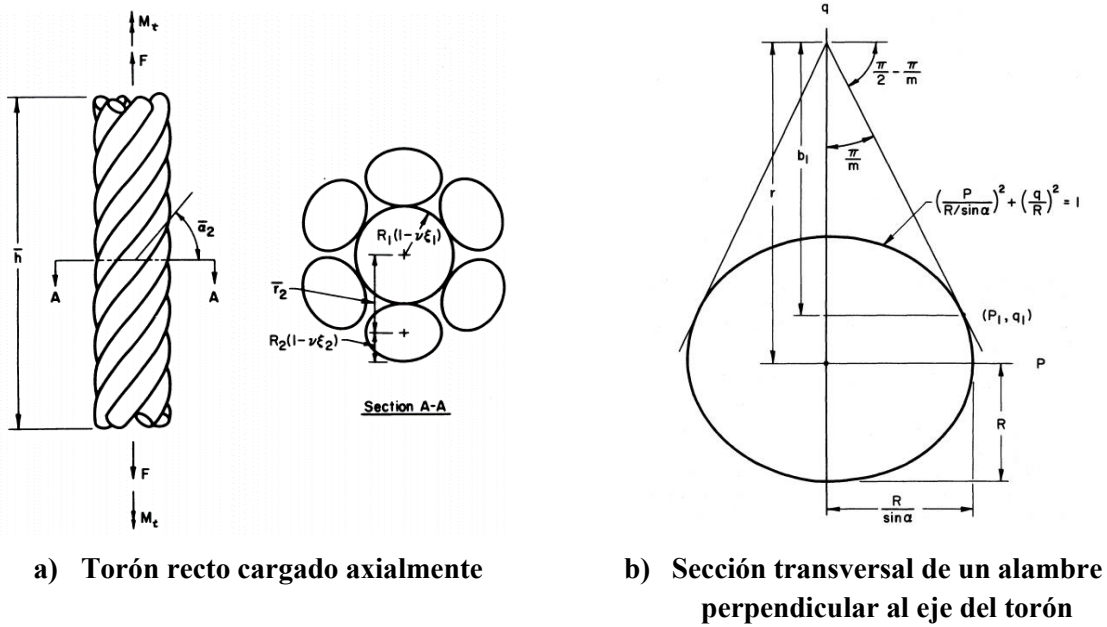
Cuando se tiene que el torón se encuentra libre en sus extremos  $T=0$ , y cuando está restringido  $\gamma=0$ .

### 6.2.1.2 Costello (1997)

Este autor realizó un análisis detallado de alambres, torones y cables de acero donde evaluó su capacidad para resistir cargas axiales, de flexión y de torsión. Para ello, inició haciendo una

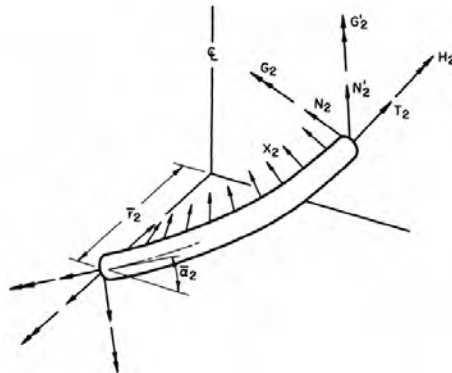
investigación de la cinemática de un alambre delgado, donde derivó sus ecuaciones de equilibrio y relacionó sus cargas internas con la deformación.

Posteriormente, integró los alambres para ser analizados como un torón, en donde determinó su respuesta estática sometido a fuerza axial y momento de torsión. El análisis se fundamenta en un torón con un alambre central y seis helicoidales. La forma de los alambres helicoidales la relacionó con la ecuación de una elipse como se ilustra en la figura 6.4.



**Figura 6.4 Consideraciones geométricas del torón de siete alambres (Costello 1997)**

Caso contrario a Machida y Durelli (1973), supuso que el alambre central es lo suficientemente grande como para evitar que los alambres helicoidales tengan contacto entre sí. Los principales datos geométricos que consideró son: el diámetro del alambre central,  $R_1$ , el diámetro de los alambres helicoidales,  $R_2$ , la longitud de paso de los alambres helicoidales,  $p_2$ , y el ángulo inicial de la longitud de paso,  $\alpha_2$ , con respecto a su horizontal (figura 6.4).



**Figura 6.5 Fuerzas actuando en un alambre helicoidal (Costello 1997)**

Proyectando las fuerzas que actúan sobre los alambres helicoidales ilustrados en la figura 6.5, en la dirección del eje axial del torón se tiene que:

$$\frac{F_2}{ER_2^2} = m_2 \left[ \frac{T_2}{ER_2^2} \sin \alpha_2 + \frac{N_2'}{ER_2^2} \cos \alpha_2 \right] \quad (6.15)$$

donde

$F_2$  fuerza axial total actuando en  $m_2$  alambres helicoidales

$m_2$  número de alambres helicoidales

$T_2$  fuerza de tensión en un alambre helicoidal

$N_2'$  fuerza cortante en un alambre helicoidal

$E$  módulo de elasticidad

El momento total de torsión axial,  $M_2$ , que actúa sobre los alambres helicoidales es:

$$\frac{M_2}{ER_2^3} = m_2 \left[ \frac{H_2}{ER_2^3} \sin \alpha_2 + \frac{G_2'}{ER_2^3} \cos \alpha_2 + \frac{T_2}{ER_2^2} \cdot \frac{r_2}{R_2} \cos \alpha_2 - \frac{N_2'}{ER_2^2} \cdot \frac{r_2}{R_2} \cdot \sin \alpha_2 \right] \quad (6.16)$$

donde

$M_2$  momento total de torsión axial que actúa sobre los alambres helicoidales

$H_2$  momento de torsión en un alambre helicoidal

$G_2'$  momento de flexión en un alambre helicoidal

$r_2$  suma de  $R_1$  y  $R_2$

Por otro lado, las fuerzas axiales,  $F_1$ , que actúan sobre el alambre central están dadas por la ecuación:

$$\frac{F_1}{ER_1^2} = \pi \xi_1 \quad (6.17)$$

donde

$\xi_1$  deformación unitaria del alambre central

En cuanto momento de torsión axial,  $M_1$ , se tiene la ecuación:

$$\frac{M_1}{ER_1^3} = \frac{\pi}{4(1+\nu)} R_1 \tau_s \quad (6.18)$$

donde

$\nu$  relación de Poisson

$\tau_s$  ángulo de giro por unidad de longitud

Finalmente, se tiene que la fuerza axial total,  $F$ , que actúan en el torón es:

$$F = F_1 + F_2 \quad (6.19)$$

y el momento de torsión axial total,  $M_t$ , es:

$$M_t = M_1 + M_2 \quad (6.20)$$

Con respecto a la determinación de los esfuerzos, en el caso del alambre central el esfuerzo axial es:

$${}_F\sigma_1 = \frac{F_1}{\pi R_1^2} \quad (6.21)$$

Para el alambre helicoidal, el esfuerzo axial debido a la carga  $T_2$  es:

$${}_T\sigma_2 = \frac{T_2}{\pi R_2^2} \quad (6.22)$$

Por último, en cuanto a las deformaciones se tiene que la fuerza axial total,  $F$ , actuando en el torón puede expresarse como la ecuación 6.23 y el momento de torsión de acuerdo a la ecuación 6.24.

$$\frac{F}{AE} = C_1\varepsilon + C_2\beta \quad (6.23)$$

$$\frac{M_t}{ER^3} = C_3\varepsilon + C_4\beta \quad (6.24)$$

Las constantes  $C_2$ ,  $C_3$ , y  $C_4$  se determinan asignando magnitudes arbitrarias a  $\varepsilon$  y  $\beta$ , y considerando que:

$$\frac{F}{A} = C_1E\varepsilon = E_c\varepsilon \quad (6.25)$$

Las deducciones anteriores sirvieron de base al autor para determinar la respuesta en un cable compuesto por torones (figura 6.2a), sometido a carga axial y flexión.

De las formulaciones anteriores, las que resultan aplicables para este trabajo son las ecuaciones 6.3 a 6.5 de Machida y Durelli (1973), ya que éstas se refieren al análisis de fuerzas en el alambre helicoidal asociadas con el desplazamiento axial y torsional del torón, específicamente la ecuación 6.3, en la cual se relacionan las deformaciones unitarias en un alambre helicoidal con las del alambre central. En otras palabras, de acuerdo con dichos autores, con esta ecuación es posible

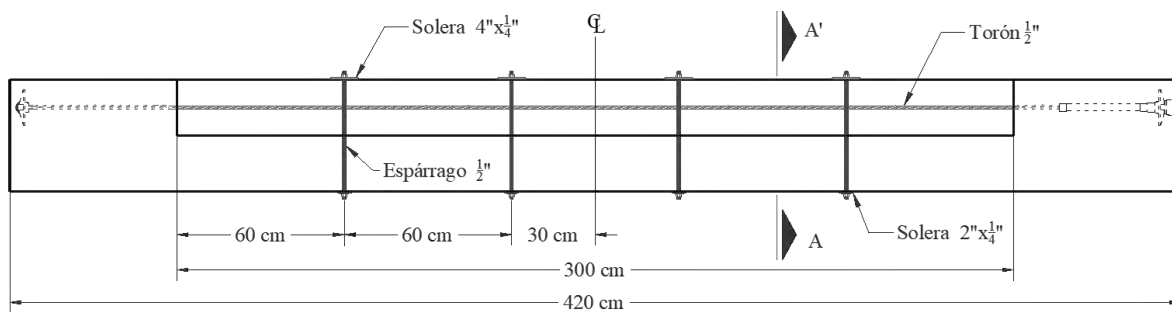
hacer la proyección de la deformación unitaria medida en un alambre helicoidal al eje longitudinal del torón. Esta posibilidad es importante ya que los *strain gages* se colocan usualmente en dirección del eje longitudinal de los alambres helicoidales.

### 6.3 ELABORACIÓN DE DISPOSITIVOS DE PRUEBA

Antes de realizar las pruebas en donde los especímenes de presfuerzo se tensarían y destensarían a magnitudes importantes de carga, fue necesario elaborar tres dispositivos identificados como: 1) dispositivo de seguridad, 2) dispositivo antideflexiones y 3) dispositivo de medición. A continuación, se describe en que consistieron.

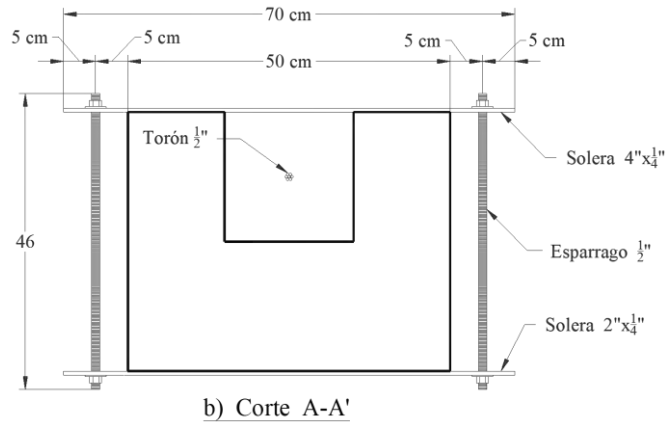
#### 6.3.1 Dispositivo de seguridad

Una vez tensados los torones a determinadas fuerzas definidas por el protocolo de prueba, se procedió a destensarlos con distintas técnicas que se discuten más adelante. Teniendo en cuenta que en dichas fuerzas de tensado se tuvieron magnitudes de hasta 15 toneladas se consideró apropiado elaborar un dispositivo de seguridad para evitar cualquier tipo de accidente al instante de llevar acabo el destensado, ya que podría liberarse una cantidad suficiente de energía en un lapso de tiempo muy corto capaz de producir el fenómeno de chicoteo o latiguo en el torón. El dispositivo de seguridad consistió en un encamisado para las trabes por medio de cinchos elaborados a base de espárragos y soleras de acero que fueron distribuidos a lo largo de la longitud de instrumentación. En la figura 6.6 se detallan las características de los elementos del dispositivo de seguridad correspondiente al modelo de ensaye TP-300.



a) Vista lateral Modelo TP-300

ESCALA S/E



**Figura 6.6 Elementos del dispositivo de seguridad**

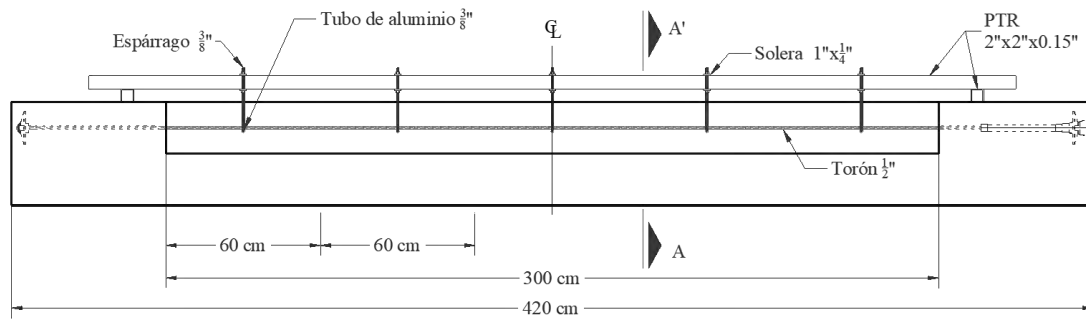
En la figura 6.7 se muestra el dispositivo construido y montado sobre una de las trabes durante la realización de las pruebas.



**Figura 6.7 Dispositivo de seguridad construido**

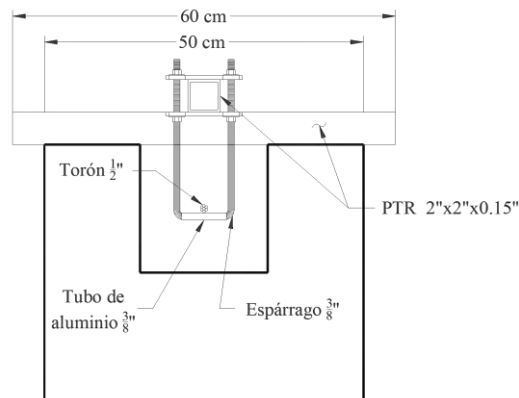
### **6.3.2 Dispositivo antideflexiones**

Con el propósito de controlar en la mayor medida de lo posible las deflexiones verticales producidas en los torones durante el proceso de destensado, se construyó un dispositivo formado por espárragos en forma de “u” que fueron sujetos en su parte superior a un perfil de acero (PTR) por medio de soleras y tornillos. El detallado de las dimensiones de los elementos y su distribución para el caso del modelo TP-300 se ilustra en la figura 6.8. El objetivo principal del dispositivo fue que los torones se deslizaran horizontalmente sobre su eje longitudinal.



a) Vista lateral Modelo TP-300

ESCALA S/E



b) Corte A-A'

**Figura 6.8 Elementos del dispositivo antideflexiones**

En la figura 6.9 se ilustra el dispositivo antideflexiones construido y montado sobre uno de los modelos de ensaye.



**Figura 6.9 Dispositivo antideflexiones construido**



### 6.3.3 Dispositivo de medición

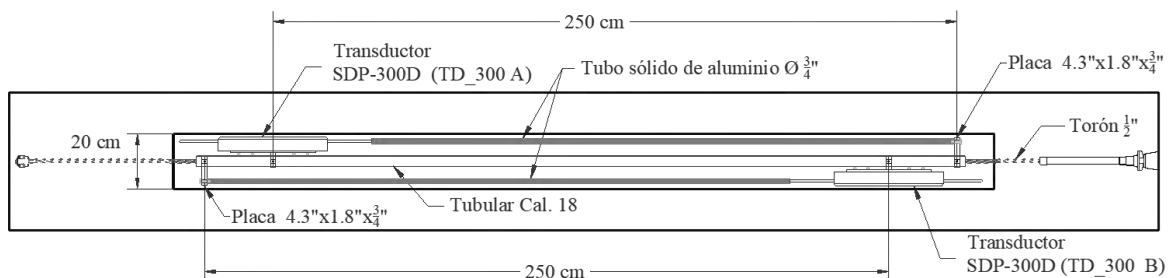
Las deformaciones unitarias se midieron con *strain gages* y se calcularon por medio de la extensión medida con transductores de desplazamiento, es decir, se obtuvieron de dos maneras. Para utilizar estos últimos, fue necesario elaborar dispositivos que permitieran sujetarlos hacia los torones de presfuerzo y, además, cumplir con las longitudes de calibración establecidas. Estas longitudes fueron: 250 cm para el modelo TP-300, 200 cm para el modelo TP-250 y 100 cm para el modelo TP-150.

Debido a la limitada sección transversal (20 x 20 cm) disponible para realizar las maniobras de instrumentación, las grandes longitudes de calibración y al peso propio de los equipos, no fue fácil proponer un dispositivo práctico y eficiente. Además, debía considerarse la medición de la elongación con dos transductores al mismo tiempo.

Inicialmente, se hicieron pruebas utilizando hilo cáñamo e hilo metálico para cumplir con las longitudes de calibración e intentando aligerar el dispositivo. Sin embargo, los resultados no fueron satisfactorios, la medición de los transductores se alteró por las propiedades mecánicas de dichos materiales.

Finalmente, después de varios intentos el dispositivo con el que se obtuvieron buenos resultados es el que se muestra en las figuras 6.10 y 6.11. Como se puede apreciar, fue posible colocar dos transductores de forma paralela para medir los alargamientos. Para su fijación, se utilizaron placas y soleras de acero (figura 6.11b), y tubo sólido de aluminio para cumplir con la longitud calibrada. Se habilitaron tres dispositivos, uno por cada modelo de ensaye.

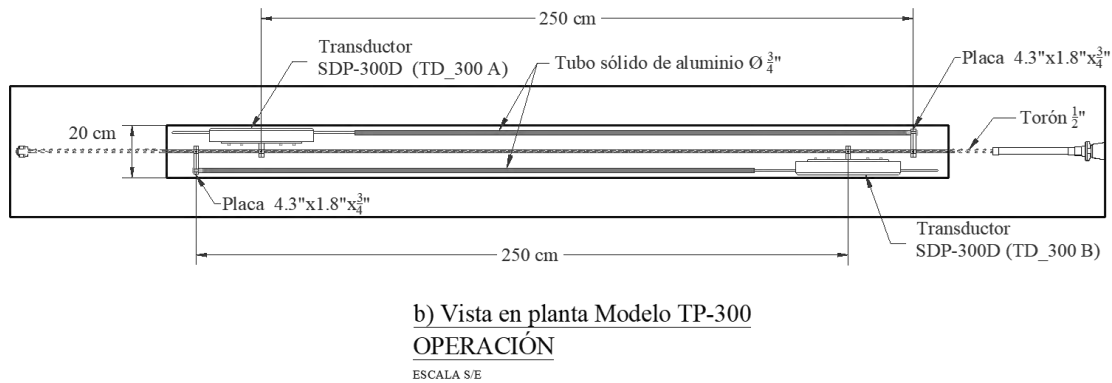
Las características del dispositivo de medición del modelo TP-300 durante las etapas de instalación y operación se ilustran en las figuras 6.10a y 6.10b, respectivamente. En este modelo, la longitud calibrada fue de 250 cm.



a) Vista en planta Modelo TP-300

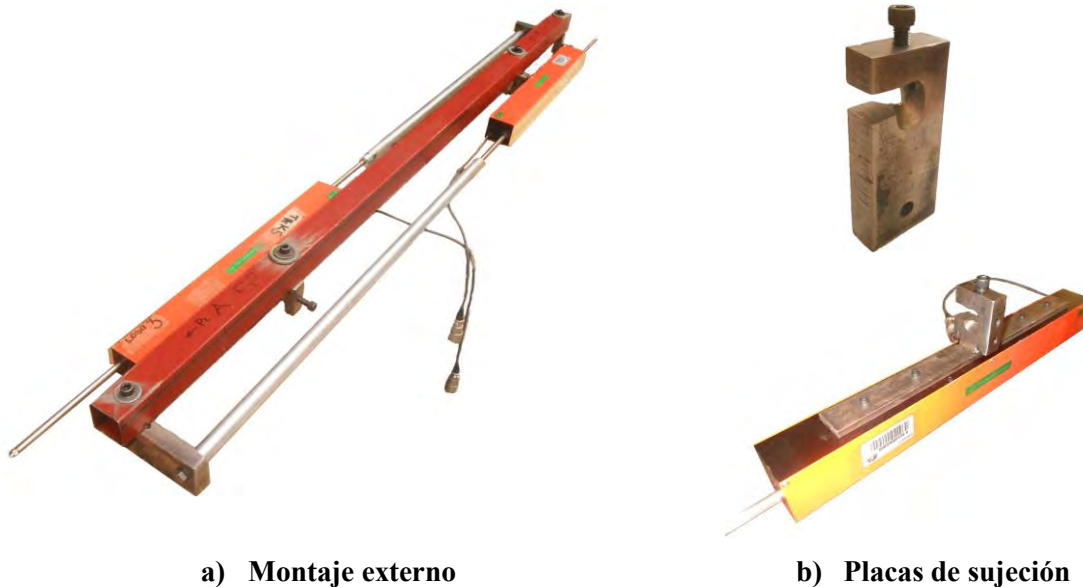
#### INSTALACIÓN

ESCALA S/E



**Figura 6.10 Elementos del dispositivo de medición con transductores de desplazamiento**

Durante las pruebas, el montaje del dispositivo se inició de forma externa a las trabes utilizando las placas de acero que se muestran en la figura 6.11b. Para ello, se fijaron los transductores y el tubo de aluminio al tubular de acero (figura 6.11a), después, todo el conjunto se presentó sobre el torón (figura 6.10a), con precaución se fijaron los transductores y, finalmente, se liberó y retiró el tubular (figuras 6.10b y 6.12). Este procedimiento se siguió para cada espécimen de prueba. La longitud calibrada se definió cuidadosamente en los puntos de fijación del tubular.



**Figura 6.11 Montaje externo del dispositivo de medición y elementos de sujeción**

Montado el dispositivo y retirado el tubular, los puntos de fijación con el torón se aseguraron utilizando tornillos tipo “allen” de tal forma que se impidiera cualquier tipo de deslizamiento. La figura 6.12 muestra los transductores colocados sobre una de las muestras de torón.



**Figura 6.12 Transductores de desplazamiento colocados sobre una muestra de torón**

#### **6.4 POSTENSADO DE ESPECÍMENES**

Como parte de las primeras actividades, se llevó a cabo el postensado de los torones inferiores en los tres modelos de ensaye. Cuando se construyeron estos modelos se dejaron preparados los anclajes pasivo y activo para realizar estos trabajos. El equipo y los accesorios que se utilizaron se muestran en las figuras 6.13 y 6.14.



**a) Gato monotorón**



**b) Cilindro hidráulico**



**c) Bomba hidráulica manual**



**d) Celdas de carga de 30 ton de capacidad,  
con un agujero central de 2.5 cm de  
diámetro**

**Figura 6.13 Equipo utilizado en el postensado**



**a) Banco de acuñaamiento**



**b) Placa circular de acero de 15 cm de  
diámetro para acuñaamiento**

**Figura 6.14 Accesorios para acuñaamiento**

En cada uno de los torones se aplicó carga con el gato monotorón hasta tener un esfuerzo de tensión de aproximadamente  $15200 \text{ kg/cm}^2$  (figura 6.15a). Al llegar a esta carga, se realizó el acuñaamiento con el cilindro hidráulico y la bomba hidráulica (figura 6.15b). Antes de utilizar las celdas de carga, se calibraron en la máquina universal de donde se obtuvo su constante de calibración.



**a) Tensado de torón 1 (TP-300)**



**b) Acuñaamiento de torón 1 (TP-300)**

**Figura 6.15 Postensado de torones inferiores del modelo TP-300**

Se calculó la elongación teórica y se verificó midiéndola físicamente una vez realizado el tensado. A continuación, se presenta el cálculo:

- Módulo de elasticidad del presfuerzo:  $E = 2002881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Esfuerzo de tensado:  $f_{\text{ten}} = 15200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Longitud total:  $L = 414 \text{ cm}$  (420 cm menos recubrimientos)

Se tiene que la deformación unitaria y la elongación teórica son:

$$\varepsilon_{\text{ten}} = \frac{15200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{2002881 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 0.00759 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

$$\text{ELONG} = \varepsilon_{\text{ten}} \cdot L = 0.00759 \frac{\text{cm}}{\text{cm}} \cdot 414 \text{ cm} = 3.14 \text{ cm}$$

La figura 6.16a muestra la medición de la elongación en uno de los torones, en donde se midieron aproximadamente 3.20 cm, lo cual resultó razonable en comparación con la calculada teóricamente (3.14 cm). La figura 6.16b muestra la marca de elongación en los tres modelos una vez concluido el tensado.



**a) Elongación del torón 2 (TP-300)**



**b) Marca de elongación en todos los torones**

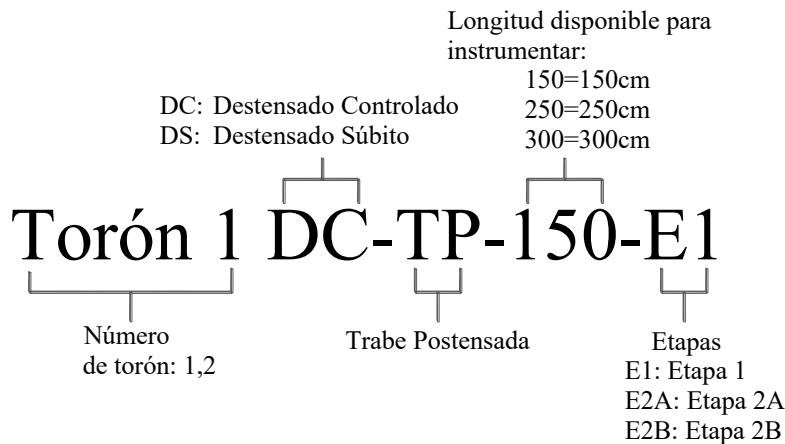
**Figura 6.16 Elongación final de torones inferiores en modelos de ensaye**

## 6.5 PRUEBAS PARA ESTIMAR EL ESFUERZO EFECTIVO DE PRESFUERZO EN CAMPO

La metodología experimental desarrollada para estimar el esfuerzo efectivo de presfuerzo en campo, se basó en medir la deformación unitaria en especímenes de torones de presfuerzo llevándolos a determinados esfuerzos de tensión y, a su vez, destensándolos a esfuerzos nulos. En todas las pruebas, los esfuerzos de tensión fueron menores que el esfuerzo de fluencia del acero de presfuerzo, es decir, se trabajó en su intervalo elástico.

Una vez tensados los torones, se procedió a destensarlos mediante dos técnicas: 1) llevando a cabo un destensado gradual y controlado por medio de una bomba hidráulica, y 2) destensando súbitamente con equipo de corte con oxiacetileno. Por esta razón, las pruebas se llevaron a cabo en dos etapas, una por cada técnica de destensado.

Por cada una de estas técnicas, se probaron dos especímenes de presfuerzo en cada modelo de ensaye (TP-150, TP-250 y TP-300). La nomenclatura que se utilizó para su identificación se ilustra en la figura 6.17.



**Figura 6.17 Nomenclatura utilizada para identificación de torones de prueba**

### 6.5.1 ETAPA 1 (DESTENSADO CONTROLADO, DC)

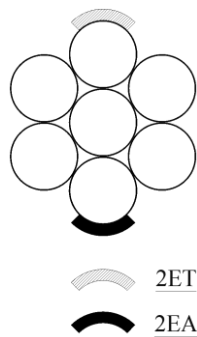
#### 6.5.1.1 Instrumentación

Sólo se utilizó el *strain gage* modelo YEFLA-2-5LT, cuyas características se detallan en la sección 4.2.3.2 del capítulo 4. Al igual que en dicha sección, la identificación utilizada es 2EA (orientado de acuerdo al eje del alambre) y 2ET (orientado de acuerdo al eje del torón).

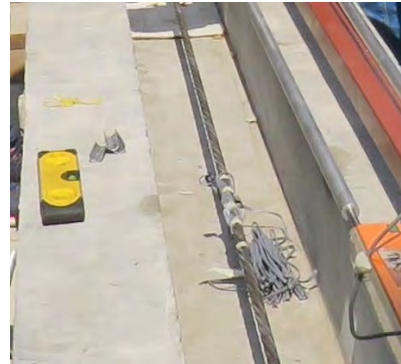
En esta etapa, se colocaron dos deformímetros (1 2EA y 1 2ET) en el punto más alto de los alambres helicoidales (figura 6.18a), y se ubicaron al centro de los especímenes de presfuerzo que corresponde al centro del claro de los modelos de ensaye, con separación entre ellos de aproximadamente 5 cm (figura 6.18b). Las deformaciones unitarias medidas con los *strain gages*



fueron adquiridas por el equipo de adquisición de datos TDS modelo 300 de la marca TML Tokyo Sokki Kenkyujo.



**a) Distribución de *strain gages***



**b) Ubicación de *strain gages***

**Figura 6.18 *Strain gages* utilizados para medir las deformaciones unitarias en la primera etapa de pruebas**

Además de los *strain gages*, se utilizaron dos transductores de desplazamiento modelo SDP-300D referidos en este documento como TD\_300 y, uno más modelo SDP-100C referido como TD\_100, ambos, de la marca TML Tokyo Sokki Kenkyujo (figura 6.19). Sus principales características se presentan en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1 Características de transductores de desplazamiento utilizados**

Características	SDP-300D	SDP-100C
Capacidad:	300 mm	100 mm
Sensibilidad ( $\times 10^{-6}$ deformación)/mm	33	50
Frecuencia de respuesta	1.5Hz	1.0Hz
Resistencia entrada y salida	350 $\Omega$	350 $\Omega$



**a) TD\_300 (modelo SDP-300D)**



**b) TD\_100 (modelo SDP-100C)**

**Figura 6.19 Transductores utilizados para medir las elongaciones**

### 6.5.1.2 Protocolo de carga e identificación de especímenes de prueba

Se realizó el tensado y destensado de las muestras de torón de forma controlada por medio de celdas de carga, un gato monotorón y una bomba hidráulica, realizando una serie de ciclos a distintos esfuerzos de tensado:  $0.40f_{pu}$ ,  $0.50f_{pu}$ ,  $0.60f_{pu}$ ,  $0.70f_{pu}$  y  $0.80f_{pu}$ , siendo  $f_{pu}=19000 \text{ kg/cm}^2$ . Estos esfuerzos, se identifican en este documento como esfuerzos de tensado objetivo.

El proceso inició en carga cero para ser incrementada hasta tener un esfuerzo de  $0.40f_{pu}$ , después, se destensó hasta llegar nuevamente a carga cero en lapsos de 2 toneladas, completando así el primer ciclo. El procedimiento fue repetido hasta realizar los ciclos para los cinco esfuerzos de tensado objetivo. Controlar la bomba hidráulica para tener exactamente dichos esfuerzos resultó complicado, sin embargo, los esfuerzos de referencia siempre fue muy aproximados a los esfuerzos objetivo. En esta etapa, se probaron seis especímenes de presfuerzo, identificados de acorde a la nomenclatura de la figura 6.17, mismos que se muestran en la tabla 6.2.

**Tabla 6.2 Especímenes de prueba en Etapa 1**

Especímenes	
1)	Torón 1 DC-TP-150-E1
2)	Torón 2 DC-TP-150-E1
3)	Torón 1 DC-TP-250-E1
4)	Torón 2 DC-TP-250-E1
5)	Torón 1 DC-TP-300-E1
6)	Torón 2 DC-TP-300-E1

### 6.5.1.3 Procedimiento de prueba

Colocado el torón de presfuerzo en la trabe, se continuó con los siguientes pasos:



**a) Colocación de instrumentación en extremo pasivo**



**b) Colocación de instrumentación en extremo activo**

**Figura 6.20 Instrumentación en extremos de modelos**



Inicialmente, se montaron los elementos del extremo pasivo: 1) placas de acuanamiento, 2) celda de carga y 3) mordazas de uso múltiple (figura 6.20a). Se continuó con el extremo activo, en donde se montó: 1) el gato monotorón, 2) el banco de acuanamiento, 3) dos placas de acuanamiento y 4) una celda de carga, así como el TD\_100 para monitorear la elongación del torón y compararla con la teórica (figura 6.20b).



**a) Conexión de *strain gages* y celdas de carga al TDS**



**b) Precarga con la bomba hidráulica y el gato monotorón**

**Figura 6.21 Equipo de adquisición de datos y bomba hidráulica**

Se procedió a conectar al TDS los 21 *strain gages* colocados en el acero de refuerzo ordinario (capítulo 3), los dos *strain gages* colocados en el acero de presfuerzo (2EA y 1ET) y las celdas de carga (figura 6.21a). Consecutivamente, se indujo una precarga al torón para dar inicio al montaje de los dispositivos de: 1) antideflexiones, 2) seguridad, y 3) medición, como se muestra en las figuras 6.22 y 6.23a, respectivamente. Asegurándose de nivelarlos y sujetarlos.



**a) Montaje de dispositivo antideflexiones**



**b) Montaje de dispositivo de seguridad**

**Figura 6.22 Montaje de dispositivos**

Finalmente, se inició la prueba induciendo carga con el gato monotorón y la bomba hidráulica (figura 6.23b) en lapsos de 2 toneladas, hasta llegar al primer esfuerzo objetivo ( $0.40f_{pu}$ ), después, se realizó el destensado de forma controlada disminuyendo la carga gradualmente con la bomba hidráulica, hasta llegar a una magnitud de cero, completando así el primer ciclo. Este proceso se

llevó a cabo hasta realizar los ciclos de todos los esfuerzos objetivo ( $40f_{pu}$ ,  $0.50f_{pu}$ ,  $0.60f_{pu}$ ,  $0.70f_{pu}$  y  $0.80f_{pu}$ ). Hacer incrementos de 2 toneladas permitió comprobar la carga y la elongación en cada paso, se evitaron incrementos súbitos de la deformación y se contó con información suficiente para validar los datos a través de gráficas carga vs elongación.



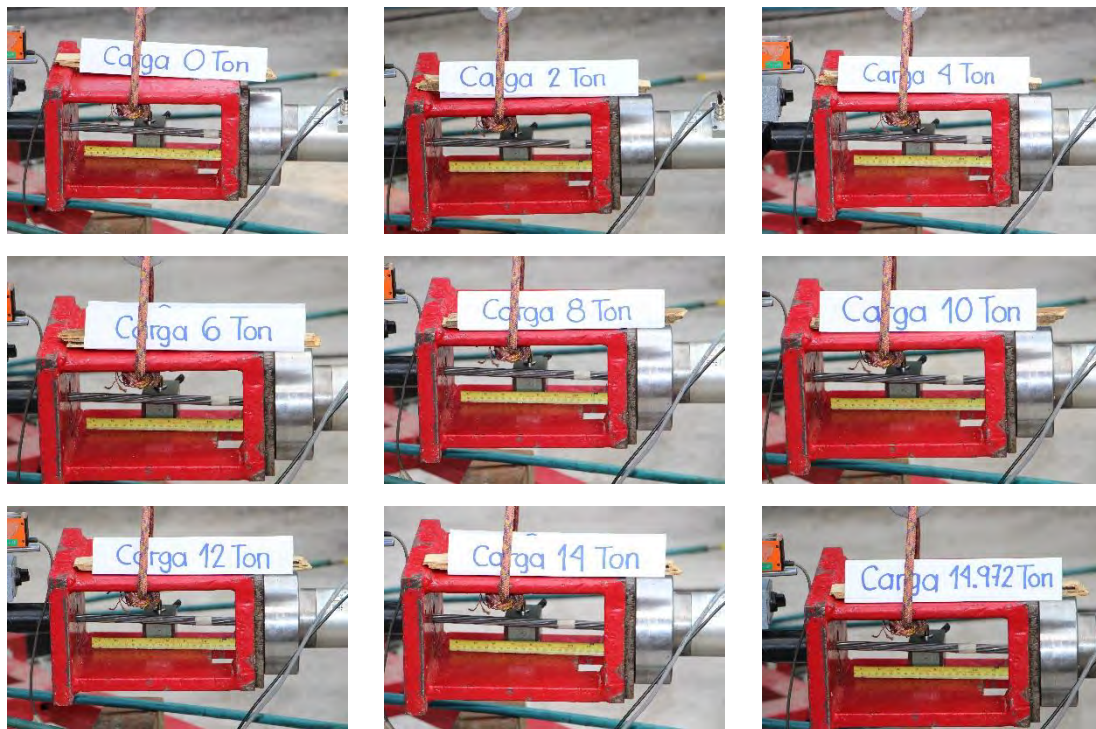
**a) Montaje del dispositivo de medición con los dos  
TD\_300**



**b) Inicio de la prueba**

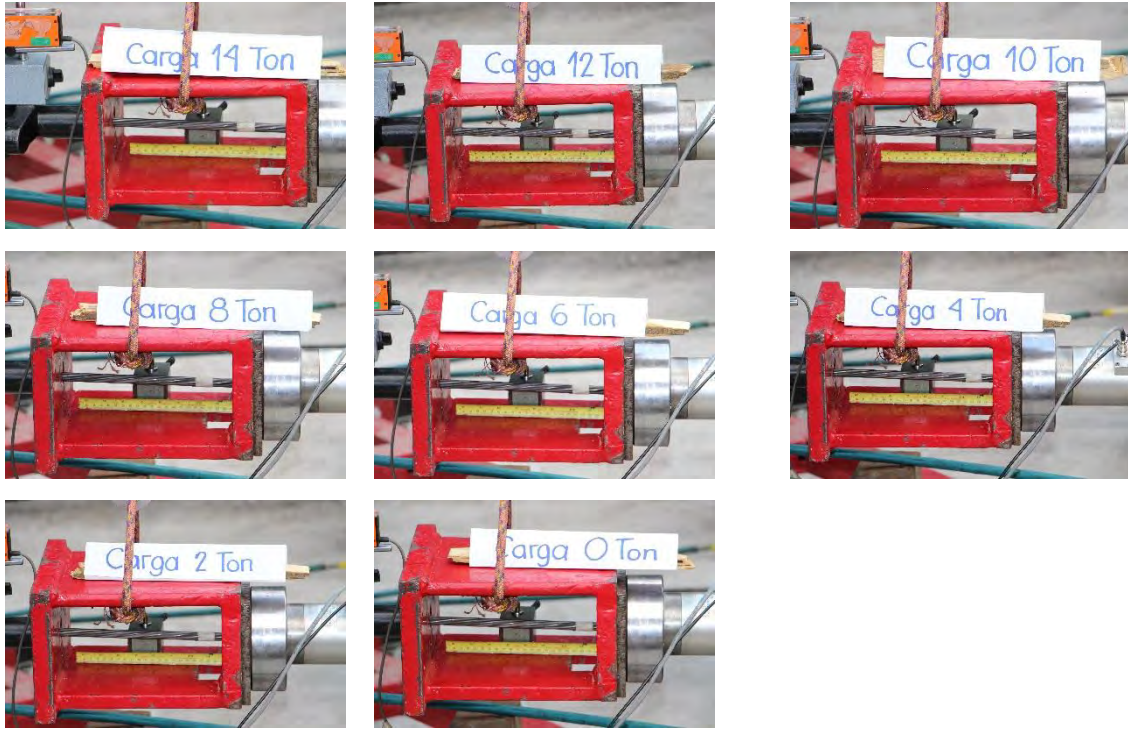
**Figura 6.23 Ejecución de la prueba**

En las figuras 6.24 (tensado) y 6.25 (destensado) se ilustra el ciclo realizado para el máximo esfuerzo objetivo ( $0.80f_{pu}$ ) en el espécimen Torón 1 DC-TP-150-E1.



**Figura 6.24 Ciclo  $0.80f_{pu}$  del espécimen Torón 1 DC-TP-150-E1 (Parte A, Tensado)**



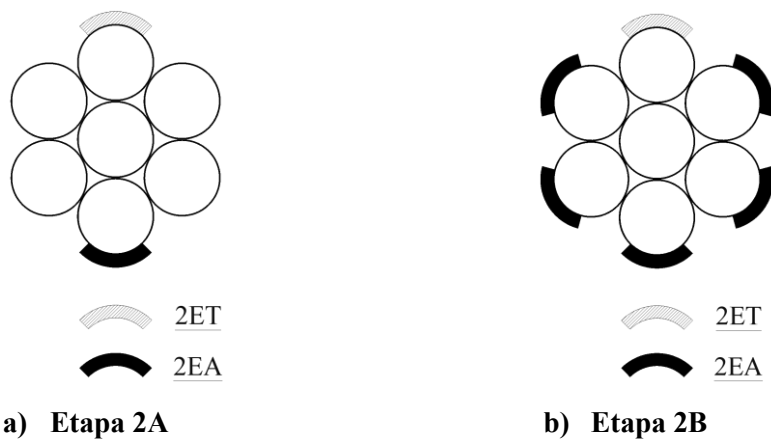


**Figura 6.25 Ciclo  $0.80f_{pu}$  del espécimen Torón 1 DC-TP-150-E1 (Parte B, Destensado)**

## 6.5.2 ETAPA 2 (DESTENSADO SÚBITO, DS)

### 6.5.2.1 Instrumentación

Debido al tipo de instrumentación que se utilizó, esta etapa se dividió a su vez en las etapas 2A y 2B. En la etapa 2A la instrumentación se hizo con sólo dos deformímetros (1 2EA y 1 ET), de forma similar a la etapa 1. Para la etapa 2B, se colocaron en los seis alambres helicoidales (5 2EA y 1 ET). Estos arreglos se ilustran en las figuras 6.26a y 6.26b, respectivamente.



**Figura 6.26 Distribución de *strain gages* en las Etapas 2A y 2B**

En las pruebas de la etapa 2A y la primera de la etapa 2B, se intentó utilizar los transductores de desplazamiento para medir las elongaciones. Sin embargo, al realizar los cortes, los impactos fueron tan intensos que los puntos de fijación fueron inefficientes, dado que permitieron deslizamientos que provocaron mediciones erróneas en prácticamente todas estas pruebas. En la figura 6.27 se muestra el resultado de una prueba donde la sujeción fue incorrecta con estos dispositivos.



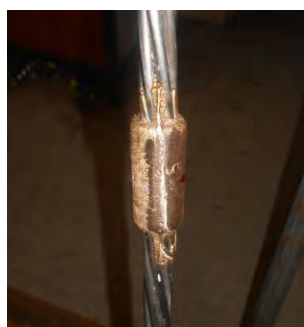
**Figura 6.27 Deslizamiento del TD\_300 en un punto de sujeción con el torón**

En el transcurso de las pruebas, se hicieron varios intentos por corregir el problema en los puntos de fijación utilizando una serie de accesorios que funcionaron como abrazaderas, con el propósito de tener una distribución de esfuerzos más uniforme. Sin embargo, a pesar de minimizar los deslizamientos, los desplazamientos medidos con los transductores continuaron siendo erróneos. De los últimos intentos que se hicieron fue utilizar la soldadura CADWELD, esta soldadura es muy empleada para unir cables de sistemas de tierra en el sector eléctrico.

Al realizar una prueba preliminar en la máquina universal, se observó que la soldadura indujo niveles elevados de temperatura a los alambres, generando un punto débil de falla como se muestra en la figura 6.28, que ocasionó la falla temprana del torón a una fuerza de tensión baja.



**a) Preparación**



**b) Antes de la prueba de tensión**



**c) Falla una vez realizada la prueba**

**Figura 6.28 Preparación y tipo de falla presentada con soldadura CADWELD**

Finalmente, debido a los resultados obtenidos, se determinó no utilizar los transductores de desplazamiento en la instrumentación de los últimos especímenes de prueba de la etapa 2B. Prácticamente, en el destensado súbito todos los datos obtenidos con este dispositivo fueron incorrectos.

### **6.5.2.2 Protocolo de carga e identificación de especímenes de prueba**

Inicialmente, se definieron esfuerzos de tensado objetivo para cada espécimen de prueba. En este caso, ya no se realizaron ciclos de carga, más bien, se inició con carga cero y se fue incrementado a través de los elementos del sistema de tensado en lapsos de carga de 2 toneladas, hasta llegar al esfuerzo objetivo correspondiente. Al llegar a dicho esfuerzo, se detuvo la carga, se preparó el equipo de oxiacetileno y se llevó a cabo el corte del torón. Sólo en los dos primeros especímenes de prueba de la etapa 2A el corte fue simultáneo para todos los alambres, para los demás, incluyendo los de la etapa 2B se intentó hacerlo relativamente pausado, es decir, alambre por alambre.

En estas dos subetapas se probaron seis especímenes de presfuerzo, identificados de acorde a la nomenclatura indicada en la figura 6.17 y mostrados en la tabla 6.3.

**Tabla 6.3 Especímenes de prueba en Etapas 2A y 2B**

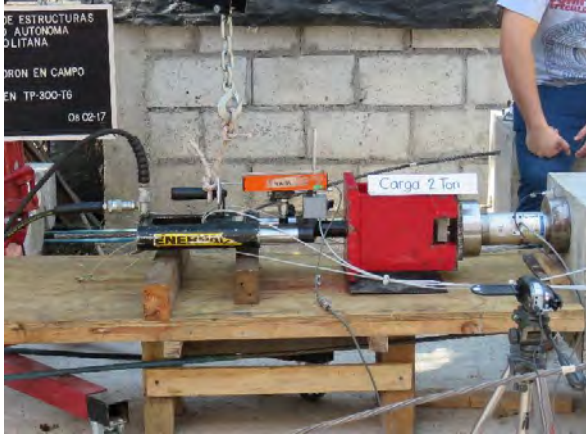
	<b>Especímenes</b>	<b>Esfuerzo objetivo</b>
<b>Etapas 2A</b>		
1)	Torón 1 DS-TP-150-E2A	$\approx 0.60f_{pu}$
2)	Torón 1 DS-TP-300-E2A	$\approx 0.60f_{pu}$
3)	Torón 2 DS-TP-300-E2A	$\approx 0.70f_{pu}$
<b>Etapas 2B</b>		
4)	Torón 2 DS-TP-150-E2B	$\approx 0.40f_{pu}$
5)	Torón 1 DS-TP-250-E2B	$\approx 0.80f_{pu}$
6)	Torón 2 DS-TP-250-E2B	$\approx 0.60f_{pu}$

### **6.5.2.3 Procedimiento de prueba**

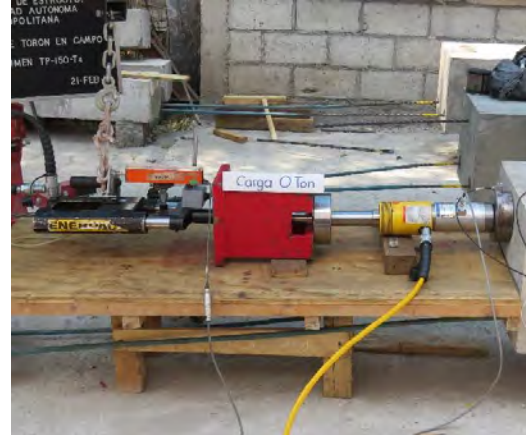
Para la etapa 2A se montaron los elementos de los extremos pasivo y activo, después se dio la precarga y se montaron los dispositivos de seguridad, antideflexiones y de medición. Estas actividades se realizaron tal y como se hizo en la etapa 1.

En el caso de la etapa 2B, se modificó el arreglo en el extremo activo del postensado adicionando un cilindro hidráulico y un juego de mordazas de uso múltiple, con la intención de aminorar el impacto generado por el corte de los torones y tratar de conseguir que el mayor número de *strain gages* midiera hasta el final del corte. En la figura 6.29 se ilustran los dos tipos de arreglos que se utilizaron para el extremo activo en estas dos subetapas.





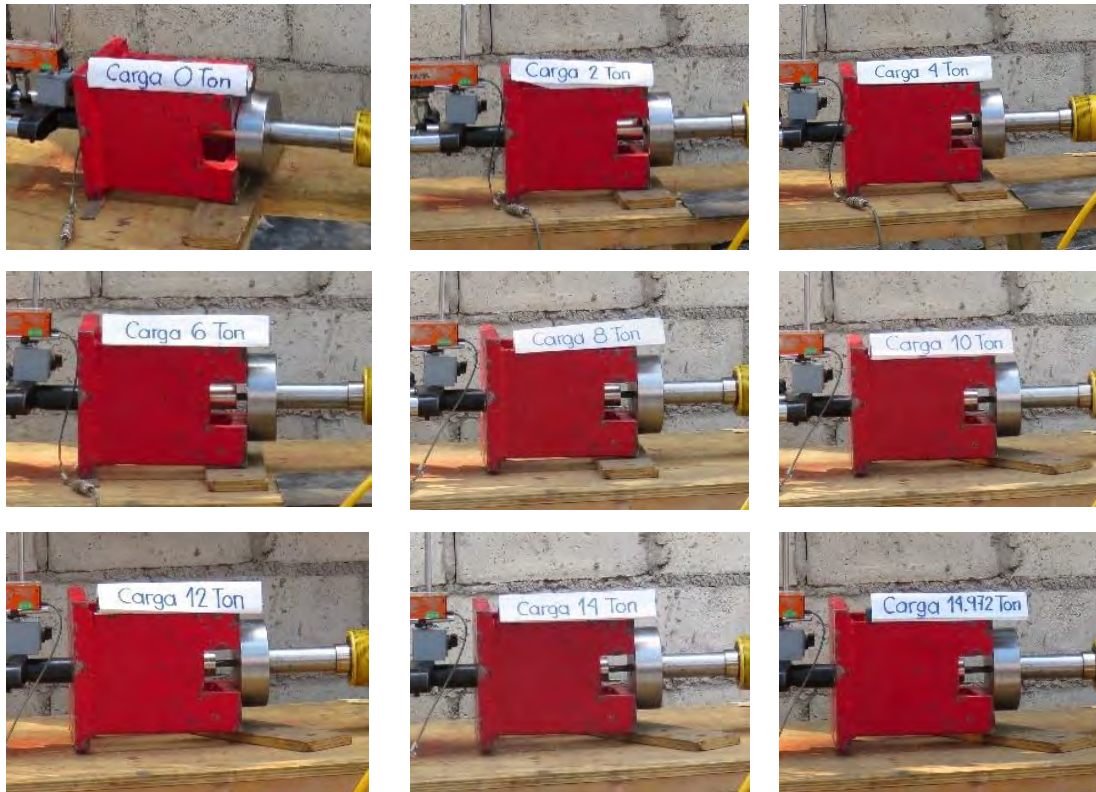
**a) Etapa 2A**



**b) Etapa 2B**

**Figura 6.29 Sistemas de postensado activo en Etapas 2A y 2B**

Las pruebas se iniciaron tensando el torón en lapsos de 2 toneladas hasta llegar al esfuerzo objetivo correspondiente (tabla 6.3). Posteriormente, se realizó el destensado súbitamente con el equipo de corte. En la figura 6.30 se ilustra el proceso de tensado del espécimen Torón 1 DS-TP-250-E2B hasta llegar a aproximadamente  $0.80f_{pu}$ .



**Figura 6.30 Esfuerzo objetivo  $\approx 0.80f_{pu}$  del espécimen Torón 1 DS-TP-250-E2B (Tensado)**

Como se aprecia en las figuras 6.31 y 6.32 los cortes se realizaron en los extremos de las trabes, justo en la parte interna del banco de acuñamiento. Para ello, como medida preventiva se aseguró en la mayor medida de lo posible el gato monotorón.

En la figura 6.31 se muestra el antes y después de realizar el corte en uno de los especímenes de prueba de la etapa 2A.



**a) Instante del corte**



**b) Después del corte**

**Figura 6.31 Corte en torón de prueba en Etapa 2A**

Del mismo modo, en la figura 6.32 muestran el antes y después de realizar el corte en unos de los especímenes de prueba de la etapa 2B.



**a) Instante del corte**



**b) Después del corte**

**Figura 6.32 Corte en torón de prueba en Etapa 2B**

En resumen, las dos principales diferencias entre las etapas 2A y 2B radicarón en el tipo de instrumentación que se utilizó, tanto con los *strain gages* como con los transductores de desplazamiento, y el arreglo en el sistema de postensado para el extremo activo.

## 6.6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 6.6.1 ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN EL DESTENSADO CONTROLADO (DC)

En el destensado controlado, se calcularon los esfuerzos producidos por el sistema de postensado, que se identifican en este documento como esfuerzos de referencia y, contra los cuales, se compararon los esfuerzos medidos con los transductores de desplazamiento y los *strain gages*. Para esto, se utilizaron las curvas esfuerzo-deformación promedio experimentales obtenidas en el capítulo 4.

A continuación, se describe el procedimiento que se siguió para el cálculo de esfuerzos en la etapa de destensado controlado en los seis torones de prueba, tomando como ejemplo el torón 1 del modelo de ensaye TP-150 de la Etapa 1. En la sección 6.6.2 se proporciona un resumen donde se analizan y discuten los resultados de todas las pruebas.

#### 6.6.1.1 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DC-TP-150-E1)

Como se observa en la tabla 6.4, para cada esfuerzo de tensión objetivo,  $\sigma_{OBJ}$ , se tuvo una carga de referencia,  $P_{REF}$ , inducida por el monotorón y la bomba hidráulica, y medida con las celdas de carga. Esta carga corresponde al promedio de las dos celdas de carga colocadas en los extremos de la trabe, cuya magnitud se dividió entre el área del torón ( $0.987 \text{ cm}^2$ ) para obtener así, el esfuerzo de referencia aplicado,  $\sigma_{REF}$ . Con esta magnitud y el módulo de elasticidad,  $E_{(LVDT)}$ , calculado con el LVDT en el capítulo 4, se calculó la deformación unitaria,  $\epsilon_{REF}$ , siguiendo la Ley de Hooke.

**Tabla 6.4 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$E_{(LVDT)}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{REF}$ [mm/mm] $\sigma_{REF}/E_{(LVDT)}$
$\approx 0.40f_{pu}$	7491	7590	2002881	0.00379
$\approx 0.50f_{pu}$	9362	9485	2002881	0.00474
$\approx 0.60f_{pu}$	11224	11372	2002881	0.00568
$\approx 0.70f_{pu}$	13112	13284	2002881	0.00663
$\approx 0.80f_{pu}$	14952	15149	2002881	0.00756

Como una medida de validación de los resultados, durante las pruebas se midieron las elongaciones,  $Elong_{TD\_100}$  en cada fuerza de tensión. Esto se hizo utilizando un transductor de desplazamiento TD\_100 colocado sobre el monotorón (figura 6.20b) y, por otro lado, se calcularon las elongaciones de referencia multiplicando la longitud existente desde el anclaje pasivo del presfuerzo hasta las cuñas del monotorón,  $L_c$ , por las deformaciones unitarias de referencia,  $\epsilon_{REF}$ . Esta revisión sólo se utilizó como referencia durante la ejecución de las pruebas, dado que la



longitud  $L_C$  se midió de forma aproximada a causa del equipo de prueba, que obstruyó e impidió hacerlo de forma más precisa (figura 6.29). Por ello, a pesar de las elevadas magnitudes del cociente  $Elong_{TD\_100}/Elong_{REF}$ , los resultados se consideraron razonables (tabla 6.5).

**Tabla 6.5 Elongaciones de validación (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$L_C$ [mm]	$Elong_{REF}$ [mm] $\epsilon_{REF} \cdot L_C$	$Elong_{TD\_100}$ [mm]	$Elong_{TD\_100} /$ $Elong_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	5400	20	25	123
$\approx 0.50f_{pu}$	5400	26	28	109
$\approx 0.60f_{pu}$	5400	31	34	109
$\approx 0.70f_{pu}$	5400	36	39	110
$\approx 0.80f_{pu}$	5400	41	46	114

#### 6.6.1.2 Cálculo de esfuerzos con los transductores de desplazamiento (Torón 1 DC-TP-150-E1)

El cálculo de los esfuerzos obtenidos con los transductores de desplazamiento se hizo a partir de la longitud calibrada. Para el caso del modelo TP-150, se tiene una longitud calibrada,  $L_{C_{TP-150}}$ , de 1000 mm (sección 6.3.3). Las elongaciones  $Elong_{TD\_300}$  son el promedio de las elongaciones medidas por los dos transductores (TD\_300 A y TD\_300 B). Las deformaciones unitarias  $\epsilon_{TD\_300}$  se calcularon como el cociente  $Elong_{TD\_300}/L_{C_{TP-150}}$ . Estas deformaciones unitarias se ubicaron en el eje de las abscisas de la curva esfuerzo-deformación promedio experimental del LVDT (capítulo 4) y se encontraron sus correspondientes esfuerzos,  $\sigma_{TD\_300}$ , intersectando la curva en el eje de las ordenadas. Como indicadores de la estimación lograda, se obtuvieron los cocientes  $\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ . Los resultados se presentan en la tabla 6.6.

**Tabla 6.6 Esfuerzos calculados con los transductores (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$L_{C_{TP-150}}$ [mm]	$Elong_{TD\_300}$ [mm]	$\epsilon_{TD\_300}$ [mm/mm]	$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] Curva LVDT	$\sigma_{TD\_300} / \sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	1000	4	0.00377	7553	100
$\approx 0.50f_{pu}$	1000	5	0.00485	9719	102
$\approx 0.60f_{pu}$	1000	6	0.00587	11755	103
$\approx 0.70f_{pu}$	1000	7	0.00680	13596	102
$\approx 0.80f_{pu}$	1000	8	0.00795	15720	104

### 6.6.1.3 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2ET (Torón 1 DC-TP-150-E1)

Para el caso del *strain gage* 2ET, dado que el equipo de adquisición de datos considera un factor de 1000000, las lecturas fueron divididas entre esa misma magnitud para obtener las deformaciones unitarias,  $\epsilon_{2ET}$ . Para obtener los esfuerzos, se aplicó el mismo procedimiento que se utilizó con los TD\_300, pero con la curva esfuerzo-deformación promedio 2ET obtenida experimentalmente con este deformímetro. Finalmente, se calcularon los cocientes  $\sigma_{2ET} / \sigma_{REF}$ , cuyos resultados se presentan en la tabla 6.7.

**Tabla 6.7 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2ET (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$E_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Lectura medida 2ET	$\epsilon_{2ET}$ [mm/mm] 2ET/1000000	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] Curva 2ET	$\sigma_{2ET} / \sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	2201170	3653	0.00365	8129	107
$\approx 0.50f_{pu}$	2201170	4531	0.00453	10017	106
$\approx 0.60f_{pu}$	2201170	5353	0.00535	11787	104
$\approx 0.70f_{pu}$	2201170	6295	0.00630	13783	104
$\approx 0.80f_{pu}$	2201170	7465	0.00746	16037	106

### 6.6.1.4 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2EA (Torón 1 DC-TP-150-E1)

Los esfuerzos correspondientes al deformímetro 2EA se calcularon igual que el deformímetro 2ET, pero utilizando su curva esfuerzo-deformación (2EA). Los resultados se presentan en la tabla 6.8.

**Tabla 6.8 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2EA (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$E_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	Lectura medida 2EA	$\epsilon_{2EA}$ [mm/mm] 2EA/1000000	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] Curva 2EA	$\sigma_{2EA} / \sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	2187943	3409	0.00341	7627	100
$\approx 0.50f_{pu}$	2187943	4271	0.00427	9521	100
$\approx 0.60f_{pu}$	2187943	5083	0.00508	11256	99
$\approx 0.70f_{pu}$	2187943	6029	0.00603	13244	100
$\approx 0.80f_{pu}$	2187943	7080	0.00708	15369	101

### 6.6.1.5 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2EA\_PROY (Torón 1 DC-TP-150-E1)

Se aplicaron las ecuaciones de Machida y Durelli (1973) para proyectar al eje longitudinal del alambre central del torón, las deformaciones unitarias medidas en los alambres helicoidales con el

*strain gage* colocado de acuerdo al eje del alambre (2EA). Concibiendo que, éstas a su vez, corresponden al eje longitudinal del torón.

Aplicando las ecuaciones, y de acuerdo a la geometría del torón:

- Longitud de paso,  $\rho = 190\text{mm}$
- Diámetro del alambre central,  $d_c = 4.37\text{mm}$
- Diámetro de los alambres helicoidales,  $d_h = 4.21\text{mm}$

Se tiene que R se calcula con la ecuación 6.1 como:

$$R = \frac{d_c}{2} + \frac{d_h}{2} = \frac{4.37\text{mm}}{2} + \frac{4.21\text{mm}}{2} = 4.29\text{mm}$$

El ángulo de la hélice, de acuerdo a la ecuación 6.2 es:

$$\tan \beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{\rho} \quad , \quad \beta = \tan^{-1} \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot 4.29\text{mm}}{190\text{mm}} \right] = 8.08^\circ$$

La ecuación 6.3 relaciona las deformaciones unitarias entre el alambre central y los alambres helicoidales. En este trabajo, no se consideran las deformaciones rotacionales, es decir  $\gamma \ll 1$ . Consecuentemente, la ecuación se reduce a:

$$\varepsilon_s^{\text{ah}} = \varepsilon \cos^2 \beta \quad (6.26)$$

De la ecuación anterior, se conoce el ángulo de la hélice,  $\beta$ , y la deformación unitaria en la hélice,  $\varepsilon_s^{\text{ah}}$ , y lo que interesa conocer es la deformación unitaria en el eje longitudinal del alambre central,  $\varepsilon$ . Despejando, se tiene que:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_s^{\text{ah}}}{\cos^2 \beta} \quad (6.27)$$

Llevada a la nomenclatura de este trabajo, se tiene que la ecuación que transforma la deformación unitaria de la hélice al eje longitudinal del torón es:

$$\varepsilon_{2EA\_PROY} = \frac{\varepsilon_{2EA}}{0.98} \quad (6.28)$$

Para calcular los esfuerzos se utilizó la curva esfuerzo-deformación experimental obtenida con el LVDT que corresponde al eje longitudinal del torón. Los resultados se presentan en la tabla 6.9.

**Tabla 6.9 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2EA\_PROY (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\epsilon_{2EA\_PROY}$	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	0.00348	6978	92
$\approx 0.50f_{pu}$	0.00436	8743	92
$\approx 0.60f_{pu}$	0.00519	10402	91
$\approx 0.70f_{pu}$	0.00615	12320	93
$\approx 0.80f_{pu}$	0.00722	14418	95

## 6.6.2 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL DESTENSADO CONTROLADO (DC)

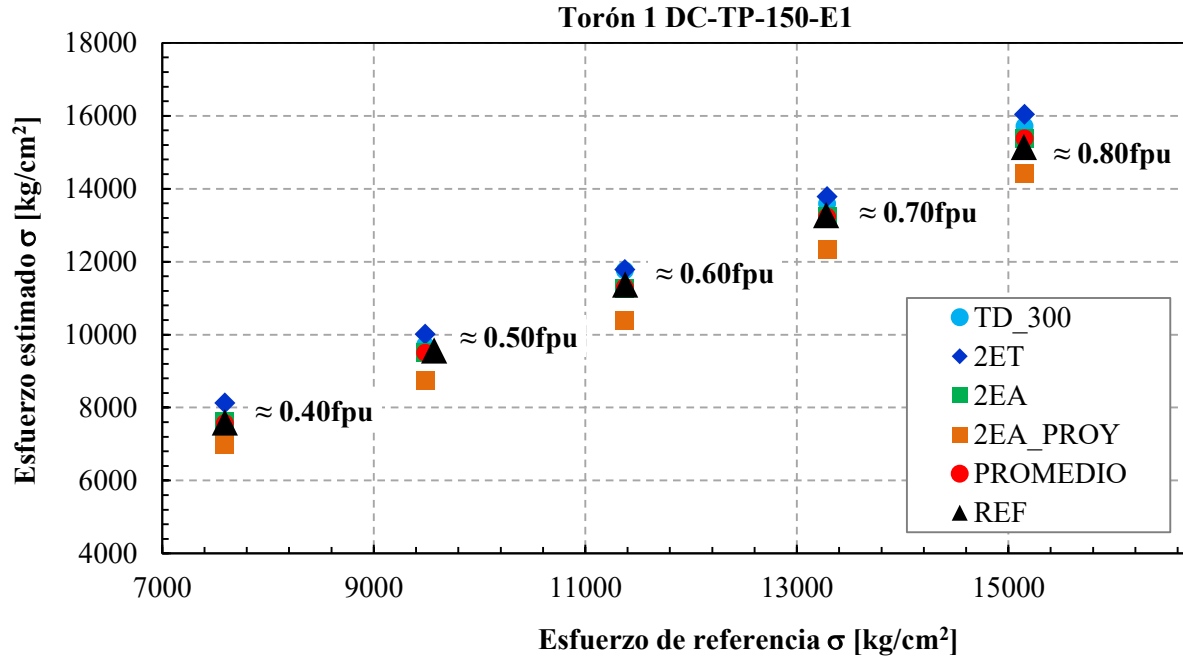
A continuación, se discuten y analizan los resultados obtenidos en las seis pruebas realizadas, mismas que se distribuyeron en los tres modelos de ensaye.

### 6.6.2.1 Torón 1 DC-TP-150-E1

Para el caso de los TD\_300, conforme se incrementó el nivel de tensión, los esfuerzos estimados se alejaron de los esfuerzos de referencia,  $\sigma_{REF}$ . Para el mayor esfuerzo de tensión, se tuvo una diferencia de 4% con respecto al esfuerzo de referencia. Sin embargo, en promedio la estimación de los esfuerzos con estos equipos sólo sobreestimó en 2% los esfuerzos de referencia. Por su parte, el *strain gage* 2ET fue el que más diferencia presentó con respecto a los esfuerzos de referencia, siendo de 5% en promedio. El *strain gage* 2EA fue el que mayor exactitud y precisión tuvo con una estimación promedio casi perfecta. En cuanto a la proyección del *strain gage* 2EA, fue la que más se alejó, subestimando los esfuerzos 7% en promedio. También, se promediaron los esfuerzos de las cuatro mediciones y las magnitudes se compararon con los esfuerzos de referencia, en promedio, se tuvo una estimación casi perfecta. En la tabla 6.10 se presentan las magnitudes discutidas y en la figura 6.33 se ilustran gráficamente.

**Tabla 6.10 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300		2ET		2EA		2EA_PROY		PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	7553	100	8129	107	7627	100	6978	92	7572	100
$\approx 0.50f_{pu}$	9485	9719	102	10017	106	9521	100	8743	92	9500	100
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	11755	103	11787	104	11256	99	10402	91	11300	99
$\approx 0.70f_{pu}$	13284	13596	102	13783	104	13244	100	12320	93	13236	100
$\approx 0.80f_{pu}$	15149	15720	104	16037	106	15369	101	14418	95	15386	102
<b>Promedio:</b>		<b>102</b>		<b>105</b>		<b>100</b>		<b>93</b>		<b>100</b>	



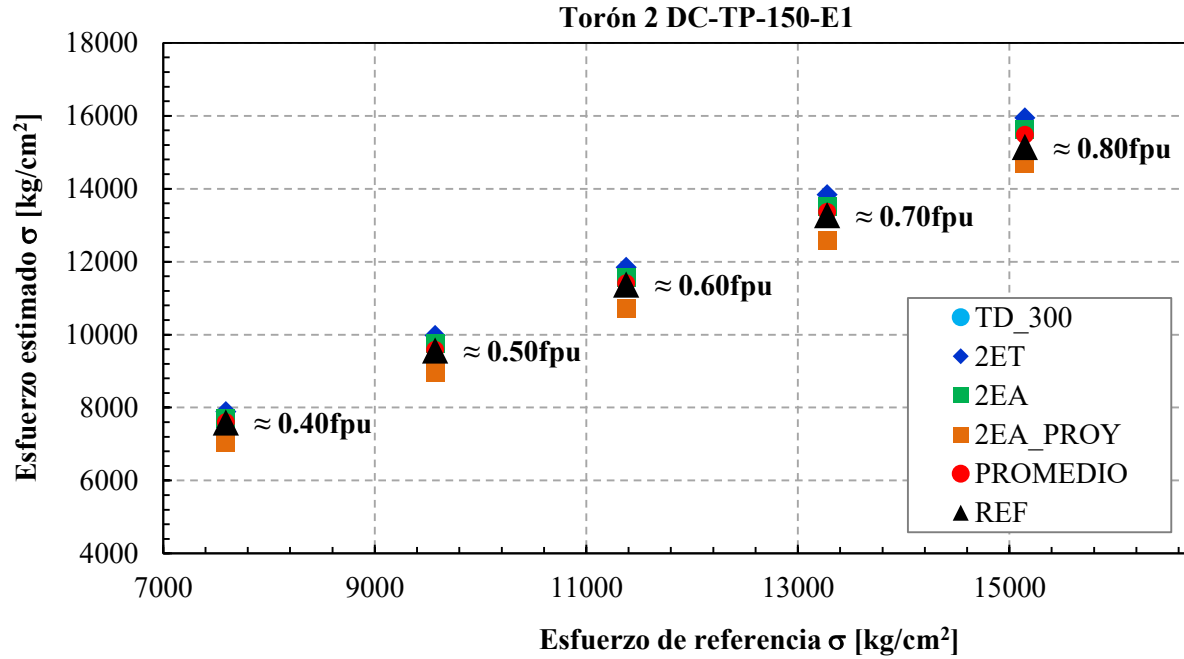
**Figura 6.33 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-150-E1)**

#### 6.6.2.2 Torón 2 DC-TP-150-E1

Los TD\_300 mostraron buena precisión en todas las fuerzas de tensado, sobreestimaron ligeramente los esfuerzos de referencia en un promedio de 2%. El *strain gage* 2ET, caso parecido al torón 1, presentó la mayor diferencia con respecto a los esfuerzos de referencia con 4% en promedio. El *strain gage* 2EA mostró buena precisión con una variación promedio de 2%. La estimación de esfuerzos con la proyección del *strain gage* 2EA, fue la que tuvo la mayor diferencia subestimando los esfuerzos 5% en promedio. El promedio de las cuatro mediciones fue la que mejor aproximación tuvo, con una diferencia promedio de sólo 1%. En la tabla 6.11 y la figura 6.34 se presentan los resultados.

**Tabla 6.11 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-150-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300			2ET			2EA			2EA_PROY			PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]		$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]		$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]		$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]		$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	7794	103		7892	104		7690	101		7040	93		7604	100
$\approx 0.50f_{pu}$	9568	9629	101		9980	104		9760	102		8973	94		9586	100
$\approx 0.60f_{pu}$	11376	11487	101		11850	104		11569	102		10719	94		11406	100
$\approx 0.70f_{pu}$	13276	13507	102		13839	104		13527	102		12594	95		13367	101
$\approx 0.80f_{pu}$	15145	15671	103		15947	105		15618	103		14697	97		15483	102
<b>Promedio:</b>		<b>102</b>			<b>104</b>			<b>102</b>			<b>95</b>			<b>101</b>	



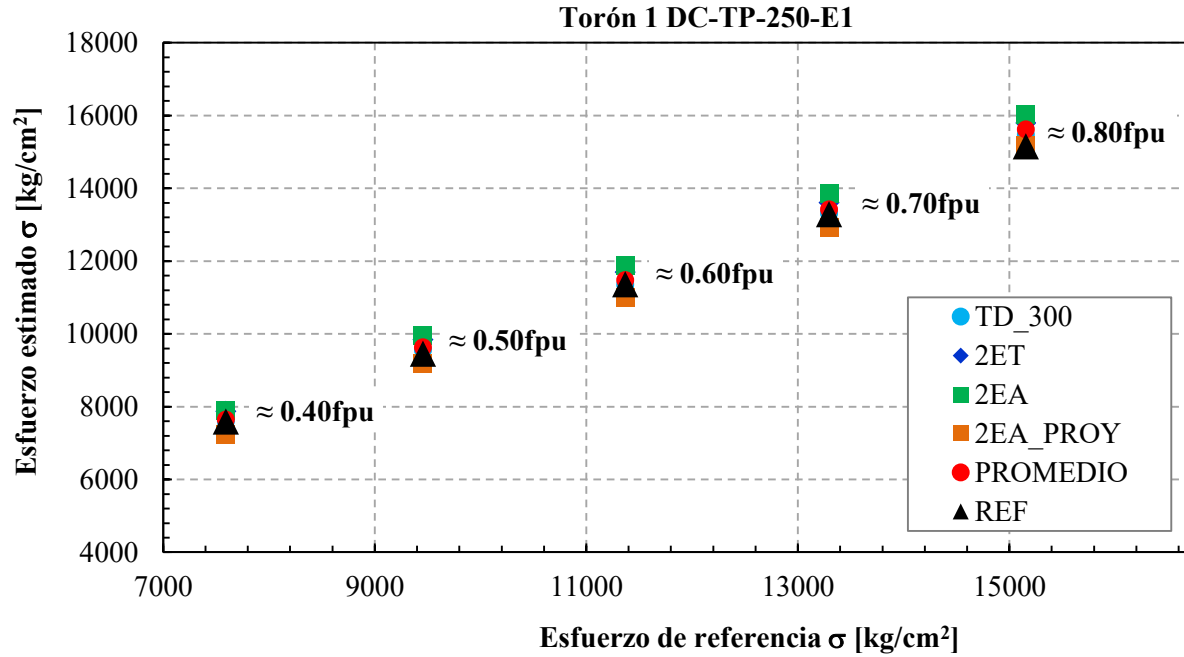
**Figura 6.34 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-150-E1)**

### 6.6.2.3 Torón 1 DC-TP-250-E1

Con los TD\_300 se tuvo buena precisión en todas las fuerzas de tensado, se sobreestimaron los esfuerzos de referencia únicamente 1% en promedio. El *strain gage* 2ET, continuó siendo de los más alejados en la estimación, en promedio sobreestimó los esfuerzos en 3%. El *strain gage* 2EA resultó con la mayor diferencia, sobreestimó en 5% los esfuerzos de referencia. La proyección del *strain gage* 2EA obtuvo mayor aproximación con respecto a los dos primeras pruebas, subestimó los esfuerzos sólo 3% en promedio. Finalmente, el promedio de las cuatro mediciones sobreestimó los esfuerzos sólo 2% en promedio. En la tabla 6.12 y en la figura 6.35 se presentan los resultados.

**Tabla 6.12 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-250-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300		2ET		2EA		2EA_PROY		PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	7599	100	7872	104	7886	104	7235	95	7648	101
$\approx 0.50f_{pu}$	9455	9554	101	9844	104	9965	105	9183	97	9637	102
$\approx 0.60f_{pu}$	11367	11352	100	11697	103	11875	104	11001	97	11481	101
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	13317	100	13607	102	13851	104	12917	97	13423	101
$\approx 0.80f_{pu}$	15153	15470	102	15793	104	16034	106	15175	100	15618	103
<b>Promedio:</b>		<b>101</b>		<b>103</b>		<b>105</b>		<b>97</b>		<b>102</b>	



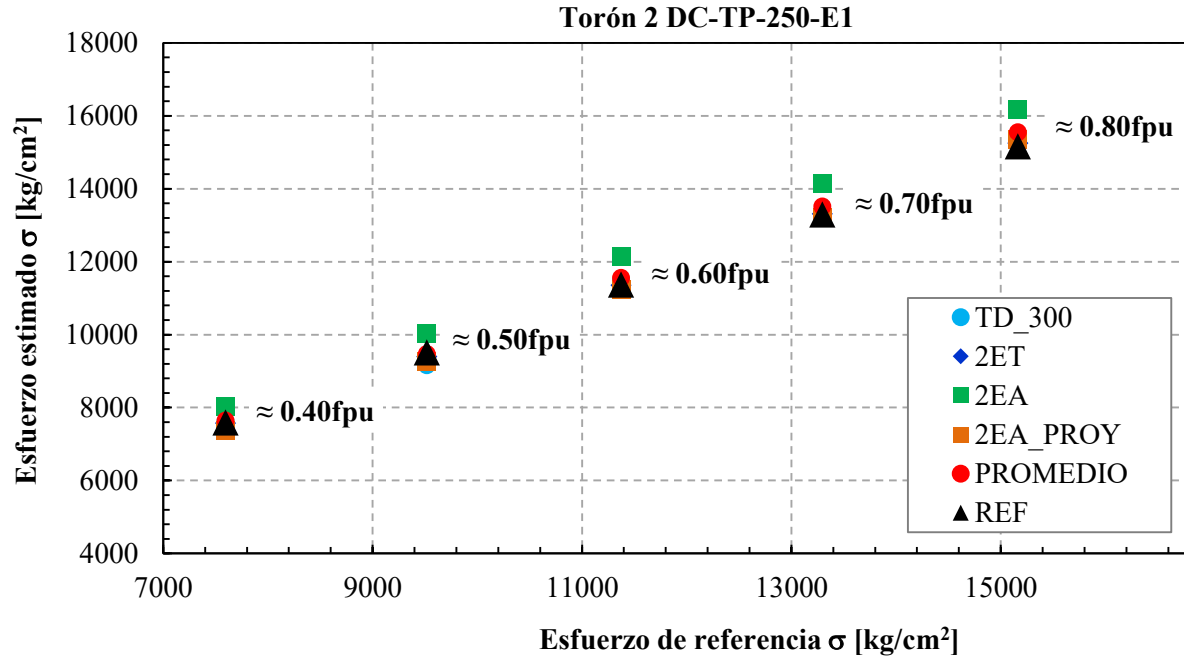
**Figura 6.35 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-250-E1)**

#### 6.6.2.4 Torón 2 DC-TP-250-E1

La estimación de los esfuerzos con los TD\_300 y el *strain gage* 2ET en comparación con los de referencia fue casi perfecta, en ambos, la diferencia promedio fue de 0%. El *strain gage* 2EA para este caso resultó con la mayor diferencia, sobreestimó en 6% los esfuerzos de referencia. La proyección del *strain gage* 2EA subestimó ligeramente los esfuerzos, con una magnitud de 1% en promedio. Por último, el promedio de las cuatro mediciones sobreestimó los esfuerzos en 1%. En la tabla 6.13 se presentan las magnitudes discutidas y en la figura 6.36 se ilustran gráficamente.

**Tabla 6.13 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-250-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300		2ET		2EA		2EA_PROY		PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	7614	100	7573	100	8035	106	7359	97	7645	101
$\approx 0.50f_{pu}$	9516	9163	96	9399	99	10042	106	9259	97	9466	99
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	11487	101	11359	100	12137	107	11248	99	11558	102
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	13390	101	13316	100	14143	106	13209	99	13514	102
$\approx 0.80f_{pu}$	15163	15445	102	15255	101	16169	107	15337	101	15551	103
<b>Promedio:</b>		<b>100</b>		<b>100</b>		<b>106</b>		<b>99</b>		<b>101</b>	



**Figura 6.36 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-250-E1)**

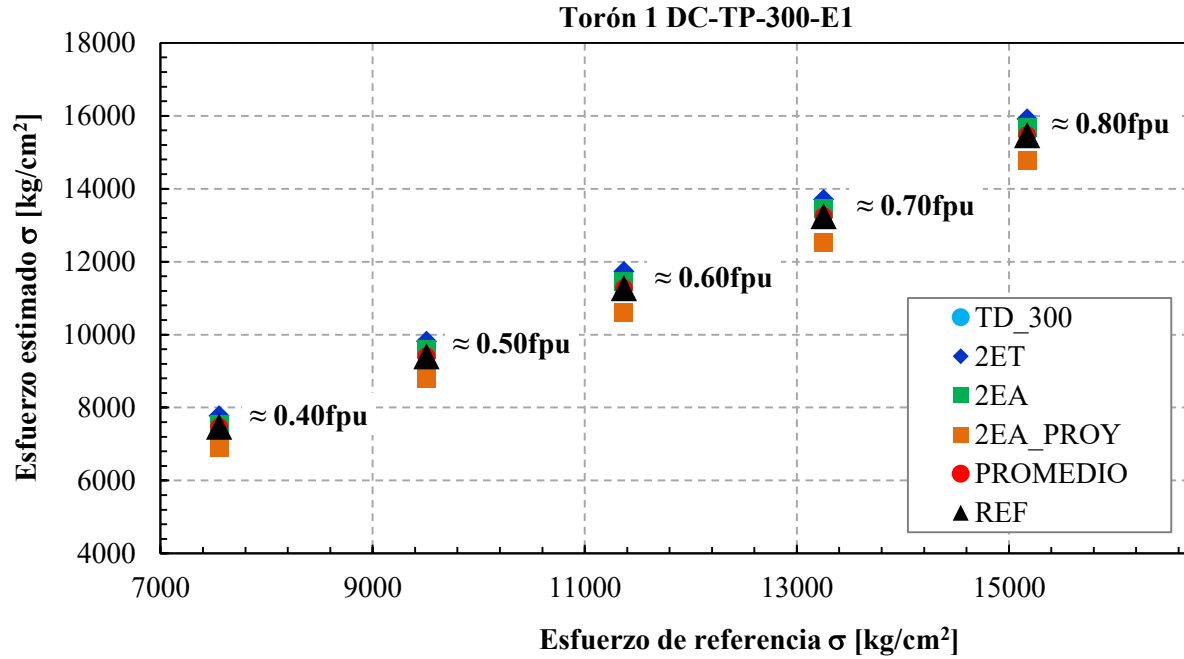
#### 6.6.2.5 Torón 1 DC-TP-300-E1

Los TD\_300 continuaron dando buenos resultados, para esta prueba, sobreestimaron los esfuerzos de referencia sólo 1% en promedio. El *strain gage* 2ET presentó la mayor diferencia con 4% en promedio, por encima de los esfuerzos de referencia. Por su parte, el *strain gage* 2EA sobreestimó sólo 1% en promedio los esfuerzos de referencia. La proyección del *strain gage* 2EA subestimó los esfuerzos en promedio 6%. Finalmente, el promedio de las cuatro mediciones estimó bien los esfuerzos de referencia con una diferencia promedio de 0%. La tabla 6.14 y la figura 6.37 muestran los resultados.

**Tabla 6.14 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-300-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300		2ET		2EA		2EA_PROY		PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7551	7716	102	7773	103	7540	100	6896	91	7482	99
$\approx 0.50f_{pu}$	9507	9436	99	9819	103	9580	101	8800	93	9409	99
$\approx 0.60f_{pu}$	11368	11296	99	11735	103	11464	101	10613	93	11277	99
$\approx 0.70f_{pu}$	13250	13319	101	13706	103	13450	102	12525	95	13250	100
$\approx 0.80f_{pu}$	15171	15490	102	15914	105	15693	103	14782	97	15470	102
<b>Promedio:</b>		<b>101</b>		<b>104</b>		<b>101</b>		<b>94</b>		<b>100</b>	





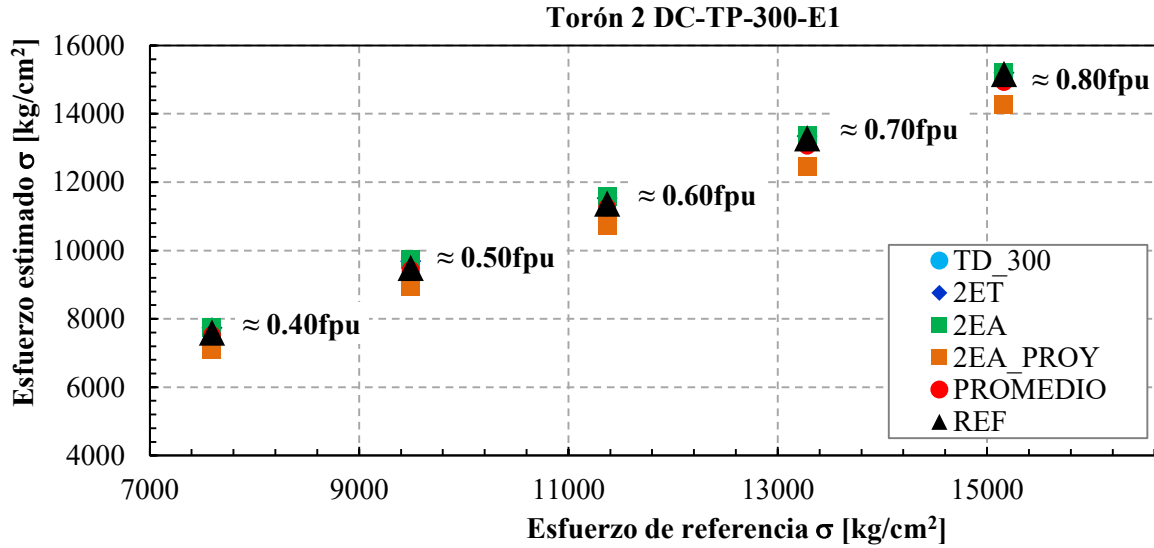
**Figura 6.37 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DC-TP-300-E1)**

#### 6.6.2.6 Torón 2 DC-TP-300-E1

Es la única prueba en la que los TD\_300 subestimaron ligeramente los esfuerzos de referencia, esto fue con 1% en promedio. El *strain gage* 2ET presentó una buena aproximación con sólo una diferencia promedio de 1% por encima de los esfuerzos de referencia. Asimismo, el *strain gage* 2EA sobreestimó muy poco los esfuerzos con sólo 1% en promedio. La proyección del *strain gage* 2EA subestimó los esfuerzos con un promedio de 6%. El promedio de las cuatro mediciones subestimó los esfuerzos de referencia en 1% en promedio. En la tabla 6.15 se presentan las magnitudes discutidas y en la figura 6.38 se ilustran gráficamente.

**Tabla 6.15 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-300-E1)**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	TD_300		2ET		2EA		2EA_PROY		PROMEDIO	
		$\sigma_{TD\_300}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{TD\_300}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF}$ [%]	$\sigma_{PROM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}/\sigma_{REF}$ [%]
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	7523	99	7738	102	7749	102	7097	93	7527	99
$\approx 0.50f_{pu}$	9494	9376	99	9683	102	9729	102	8943	94	9433	99
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	11224	99	11534	101	11571	102	10721	94	11263	99
$\approx 0.70f_{pu}$	13280	13095	99	13352	101	13374	101	12450	94	13068	98
$\approx 0.80f_{pu}$	15162	15031	99	15205	100	15213	100	14264	94	14928	98
<b>Promedio:</b>		<b>99</b>		<b>101</b>		<b>101</b>		<b>94</b>		<b>99</b>	



**Figura 6.38 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DC-TP-300-E1)**

#### 6.6.2.7 Comentarios

Se concluye que los TD\_300 fueron los que mejor estimación de esfuerzos tuvieron con respecto a los esfuerzos de referencia, en la mayoría de los casos, la diferencia promedio no excedió el 1%. En cuanto a las estimaciones de los *strain gages* 2ET y 2EA, se consideran favorables dado que la diferencia máxima promedio entre los esfuerzos estimados y los de referencia no excede el 6%. Por su parte, las estimaciones de los esfuerzos obtenidas con la proyección de las deformaciones unitarias del *strain gage* 2EA aplicando las fórmulas de Machida y Durelli (1973), en todos los casos, subestimaron los esfuerzos de referencia, sin embargo, en virtud de que la diferencia máxima promedio es de 7% su estimación se considera aceptable. Asimismo, el promedio de las cuatro mediciones tuvo buena aproximación en comparación con los esfuerzos de referencia en prácticamente todas las pruebas, siendo la máxima diferencia promedio de 2%. Por lo tanto, de acuerdo a las pruebas realizadas destensando el torón de forma controlada se tiene que tanto los *strain gages* como los transductores de desplazamiento, resultan aptos para estimar la fuerza efectiva de presfuerzo con buena precisión. En la tabla 6.16 se resume la estimación que se obtuvo de los esfuerzos de referencia a partir de los promedios de todas las pruebas.

**Tabla 6.16 Resumen de aproximación en promedios en el DC**

Espécimen	TD_300	2ET	2EA [%]	2EA_PROY	PROMEDIO
Torón 1 DC-TP-150-E1	102	105	100	93	100
Torón 2 DC-TP-150-E1	102	104	102	95	101
Torón 1 DC-TP-250-E1	101	103	105	97	102
Torón 2 DC-TP-250-E1	100	100	106	99	101
Torón 1 DC-TP-300-E1	101	104	101	94	100
Torón 2 DC-TP-300-E1	99	101	101	94	99
	101	103	103	95	100

### 6.6.3 ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS EN EL DESTENSADO SÚBITO (DS)

En esta sección, se describe el procedimiento utilizado para calcular los esfuerzos en los seis torones de prueba del destensado súbito. Se tomó como ejemplo el cálculo de esfuerzos para el torón 1 del modelo TP-150 de la etapa 2A. Debido a los resultados desfavorables obtenidos con los TD\_300 en las etapas 2A y 2B, sus mediciones fueron omitidas en este análisis.

Sólo se presenta el procedimiento que se llevó a cabo para contar con los indicadores de precisión alcanzados. En la sección 6.6.4 se proporciona un resumen donde se analizan y discuten a detalle los resultados de todas las pruebas.

#### 6.6.3.1 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

Para cada una de las pruebas se definió un esfuerzo de tensado objetivo,  $\sigma_{OBJ}$ , en ésta fue de  $\approx 0.60f_{pu}$  (tabla 6.3). Para ello, se indujo carga hasta llegar a la correspondiente a dicho esfuerzo,  $P_{REF}$ , por medio de la bomba hidráulica y el gato monotorón, la cual se midió con celdas de carga. La magnitud de  $P_{REF}$  es el promedio de las dos celdas de carga colocadas en los extremos de la trabe. El esfuerzo de referencia,  $\sigma_{REF}$ , se calculó dividiendo la carga  $P_{REF}$  entre el área del torón ( $98.7 \text{ mm}^2$ ). Al alcanzar el esfuerzo objetivo, se llegó al estado definido como “torón tenso”, a partir de ese instante se dio inicio al corte de los alambres del torón (pasos 1 a 5 de la tabla 6.17). Se esperaba que después de estar tenso el torón, y habiendo finalizado el proceso de corte existieran siete secuencias de corte dado que el torón tiene siete alambres. Sin embargo, en la mayoría de los casos sólo se registraron entre cinco y seis secuencias finales, es probable que en estos casos se hayan cortado dos alambres al mismo tiempo. Para cada secuencia de corte, se midió la carga  $P_{REF}$  y se calculó  $\sigma_{REF}$ .

Al iniciar la prueba se dio una precarga,  $\sigma_{PRECARGA}$ , para tensar un poco al torón y facilitar su instrumentación. Esta precarga (785 kg), se sumó a la carga de referencia del esfuerzo objetivo, para obtener así el esfuerzo de referencia corregido,  $\sigma_{REF\_CORR}$ , con el que se compararían los esfuerzos calculados a través de los *strain gages* 2EA y 2ET.

**Tabla 6.17 Cálculo de esfuerzos de referencia (Torón 1 DS-TP-150-E2A)**

$\sigma_{OBJ}$	Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$
$\approx 0.60f_{pu}$	Torón tenso	11237	11385	12181
	1	9358	9481	
	2	6876	6967	
	3	4395	4453	
	4	2823	2861	
	5	-785	-796	

### 6.6.3.2 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2EA (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

Al llegar al esfuerzo objetivo (torón tenso), los deformímetros se pusieron en ceros para medir la deformación unitaria en el regreso del torón durante el proceso de corte (etapas secuenciales) hasta el final, donde el torón quedó totalmente liberado de esfuerzos de tensión. A través de la deformación unitaria medida,  $\epsilon_{2EA}$ , en las etapas secuenciales se calcularon los esfuerzos tal y como se hizo en las pruebas de destensado controlado, haciendo uso de la curva esfuerzo-deformación promedio experimental obtenida para 2EA (tabla 6.18). El último esfuerzo medido con el *strain gage* que corresponde a la última secuencia de corte (secuencia 5) es el que principalmente se comparó con el esfuerzo de referencia corregido,  $\sigma_{REF\_CORR}$ , por medio del cociente  $\sigma_{2EA} / \sigma_{REF\_CORR}$ .

**Tabla 6.18 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2EA (Torón 1 DS-TP-150-E2A)**

Secuencia de corte	Lectura medida 2EA	$\epsilon_{2EA}$	$\sigma_{2EA}$	$\sigma_{REF\_CORR}$	$\sigma_{2EA}$
		[mm/mm] 2EA/1000000	[kg/cm <sup>2</sup> ] Curva 2EA	[kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
Torón tenso	0	0	0	12181	0
1	1064	0.00106	2333		19
2	-184	-0.00018	-		-
3	2978	0.00298	6703		55
4	5045	0.00505	11182		92
5	5691	0.00569	12549		103

### 6.6.3.3 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2EA\_PROY (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

De la misma forma que en el destensado controlado, se aplicaron las ecuaciones de Machida y Durelli (1973) para proyectar las deformaciones unitarias medidas en el eje del alambre hacia el eje longitudinal del torón, y se utilizó la curva esfuerzo-deformación obtenida con el LVDT para calcular los esfuerzos (tabla 6.19).

**Tabla 6.19 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2EA\_PROY (Torón 1 DS-TP-150-E2A)**

$\epsilon_{2EA\_PROY}$	$\sigma_{2EA\_PROY}$	$\sigma_{REF\_CORR}$	$\sigma_{2EA\_PROY} / \sigma_{REF\_CORR}$
	[kg/cm <sup>2</sup> ]	[kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	[%]
0.00543	10896	12181	0
0.00109	2149		18
-0.00019	-		-
0.00304	6102		50
0.00515	10324		85
0.00581	11637		96

#### 6.6.3.4 Cálculo de esfuerzos con el *strain gage* 2ET (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

Como se observa en la tabla 6.20, el deformímetro dejó de medir justo después de iniciar el proceso de corte, que pudo deberse a diversas razones. Una de ellas, es que tal vez el deformímetro se encontraba colocado en el primer alambre que se cortó, lo cual debe evitarse en la mayor medida de lo posible. Otra, es que en la secuencia de corte inicial existió fricción entre los alambres a tal grado que provocó su desprendimiento. Sin embargo, resulta complejo identificar exactamente la causa. Por consiguiente, la tabla 6.20 no presenta esfuerzos estimados con este deformímetro.

**Tabla 6.20 Esfuerzos estimados con el *strain gage* 2ET (Torón 1 DS-TP-150-E2A)**

Secuencia de corte	Lectura medida 2ET	$\epsilon_{2ET}$ [mm/mm] 2ET/1000000	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] Curva 2ET	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
Torón tenso	0.00	0.00000	0.00	12181	-
1	-1205	-0.00120	-		-
2	0.00	0.00000	-		-
3	0.00	0.00000	-		-
4	0.00	0.00000	-		-
5	0.00	0.00000	-		-

#### 6.6.4 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL DESTENSADO SÚBITO (DS)

A continuación, se discuten y analizan los resultados obtenidos en las seis pruebas de destensado súbito, siendo dos por cada modelo de ensaye.

##### 6.6.4.1 ETAPA 2A

##### 6.6.4.1.1 Torón 1 DS-TP-150-E2A

El *strain gage* 2ET no registró mediciones. Por el contrario, el *strain gage* 2EA midió hasta el último paso secuencial a excepción de la medición del paso 2, en el que las lecturas fueron erróneas y se decidió omitirlas en este análisis. Este *strain gage*, estimó bien el esfuerzo de referencia corregido, sobreestimándolo en sólo 3%. Con la proyección del *strain gage* 2EA, se subestimó el esfuerzo de referencia corregido en 4%. En esta prueba, el esfuerzo objetivo fue  $\approx 0.60f_{pu}$ . En la tabla 6.21 y en la figura 6.39 se presentan los resultados.

Tabla 6.21 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$				2ET	2EA		2EA_PROY	
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]
Torón tenso	11237	11385	12181	0	0	0	0	0
1	9358	9481		-	2333	19	2149	18
2	6876	6967		-	-	-	-	-
3	4395	4453		-	6703	55	6102	50
4	2823	2861		-	11182	92	10324	85
5	-785	-796		-	12549	103	11637	96

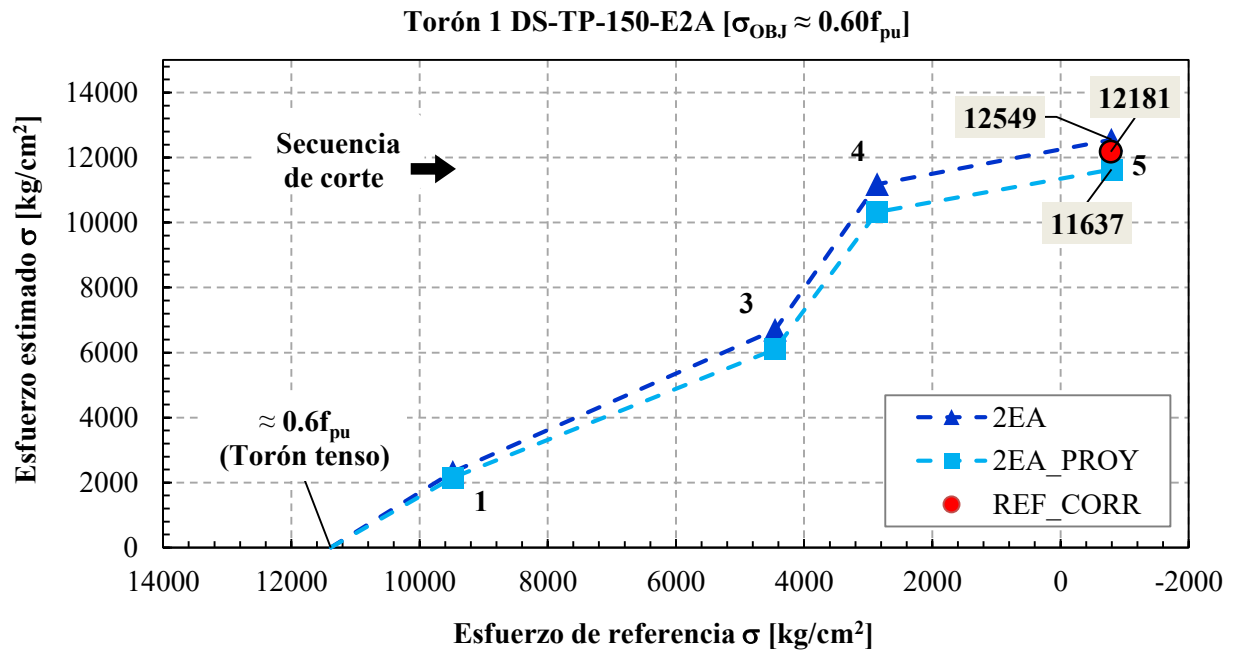


Figura 6.39 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-150-E2A)

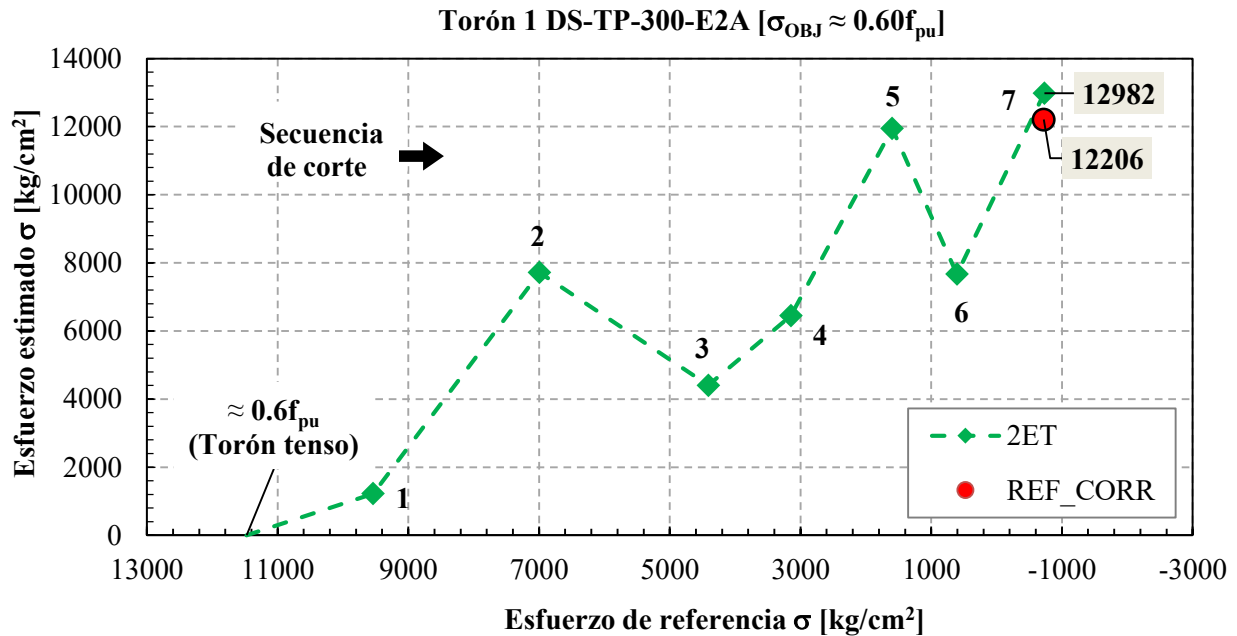
#### 6.6.4.1.2 Torón 1 DS-TP-300-E2A

Se tuvo un esfuerzo objetivo de  $\approx 0.60f_{pu}$ . En este torón, sólo registró medidas el *strain gage* 2ET y lo hizo en todos los pasos. La estimación lograda es buena, dado que sólo sobreestimó el esfuerzo de referencia corregido en 6%. En la tabla 6.22 se presentan los resultados y en la figura 6.40 se ilustran gráficamente.

Durante la ejecución de las pruebas, se observó que conforme se avanzaba en el proceso de corte, los alambres helicoidales se reacomodaban, esto puede ser el motivo de las caídas que observan en la figura 6.40.

**Tabla 6.22 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-300-E2A)**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$							
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$		$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
				[kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2ET} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]		
Torón tenso	11326	11475	12206	0	0	0	0
1	9413	9537		1222	10	-	-
2	6902	6993		7717	63	-	-
3	4353	4410		4406	36	-	-
4	3105	3146		6448	53	-	-
5	1577	1597		11947	98	-	-
6	599	606		7671	63	-	-
7	-721	-731		12982	106	-	-



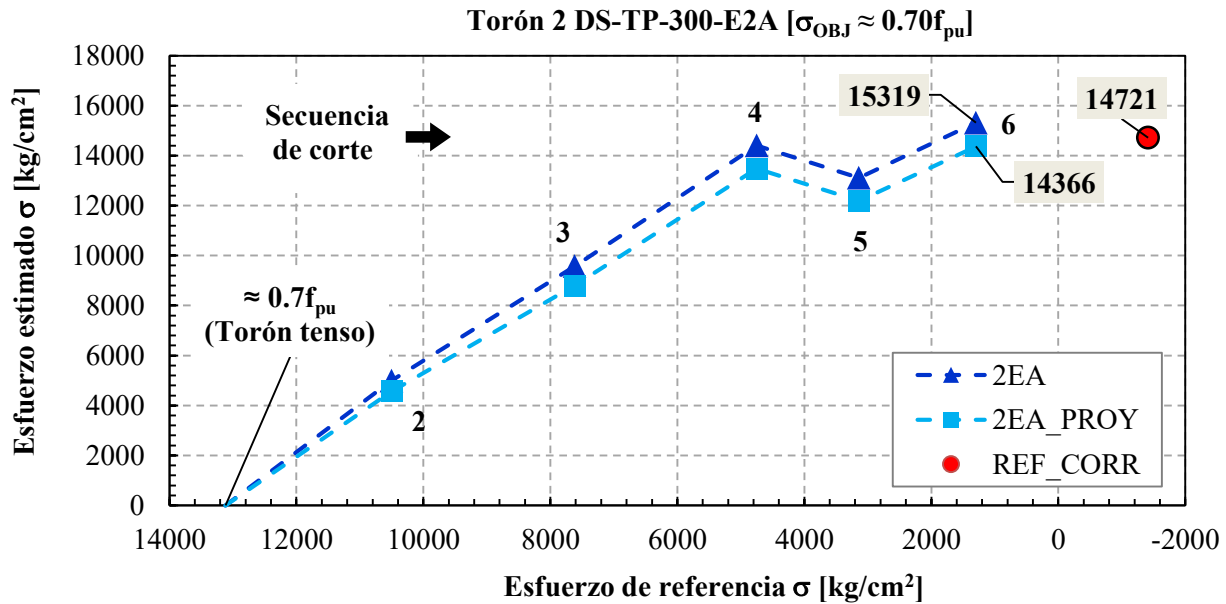
**Figura 6.40 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-300-E2A)**

### 6.6.4.1.3 Torón 2 DS-TP-300-E2A

En esta prueba se tuvo un esfuerzo objetivo de  $\approx 0.70f_{pu}$ . El *strain gage* 2ET no registró ningún dato. Por su parte, el *strain gage* 2EA midió hasta el penúltimo paso secuencial, en donde el esfuerzo estimado es sólo 4% mayor que el esfuerzo de referencia corregido. Al realizar la proyección de este *strain gage* con las fórmulas de Machida y Durelli (1973), se tiene una magnitud final que subestima en sólo 2% el esfuerzo de referencia corregido. En la tabla 6.23 se presentan las magnitudes discutidas y en la figura 6.41 se ilustran gráficamente.

**Tabla 6.23 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-300-E2A)**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.70f_{pu}$								
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]	$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA\_PROY} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]
Torón tenso	13117	13290	14721	0	0	0	0	0
1	12890	13060		-	-	-	-	-
2	10499	10637		-	4996	34	4571	31
3	7616	7716		-	9580	65	8800	60
4	4750	4813		-	14407	98	13474	92
5	3140	3182		-	13114	89	12184	83
6	1295	1312		-	15319	104	14366	98
7	-1413	-1432		-	-	-	-	-



**Figura 6.41 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-300-E2A)**



### 6.6.4.2 ETAPA 2B

#### 6.6.4.2.1 Torón 2 DS-TP-150-E2B

En esta prueba se tuvo un esfuerzo objetivo de  $\approx 0.40f_{pu}$ . Se colocó sólo un *strain gage* 2ET que dejó de medir después del segundo paso de corte, y cinco *strain gages* 2EA de los cuales sólo tres registraron hasta el final, identificados como 2, 3 y 5 en las tablas 6.24 y 6.25. El *strain gage* 2 subestimó en 12% el esfuerzo de referencia corregido, el 3 y 5 lo sobreestimaron en 27% y 23%, respectivamente. Obteniendo un promedio de estos tres deformímetros y comparando dicha magnitud con el esfuerzo de referencia corregido, se sobreestima este último en 13%.

**Tabla 6.24 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte A**

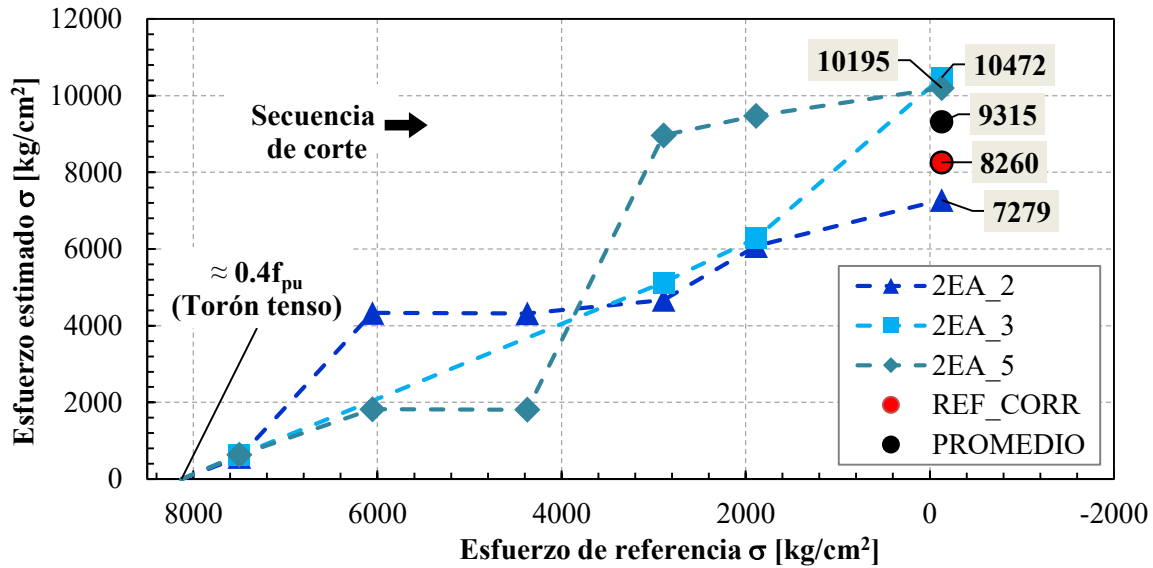
$\sigma_{OBJ} \approx 0.40f_{pu}$				
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Torón tenso	8025	8130	8260	0
1	7401	7499		571
2	5976	6055		-
3	4316	4373		-
4	2854	2892		-
5	1860	1884		-
6	-128	-130		-

**Tabla 6.25 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte B**

$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]					$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}$ FINAL/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
	1	2	3	4	5	2	3	5		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	9315	113
571	588	576	631	613	633	7	8	8		
-	2618	4334	-	-	1821	52	-	-		
-	2610	4321	-	-	1808	52	-	-		
-	-	4671	5127	-	8965	57	62	109		
-	-	6076	6284	-	9473	74	76	115		
-	-	7279	10472	-	10195	88	127	123		

Inicialmente, el esfuerzo de tensado estaba pensado para que fuese  $\approx 0.80f_{pu}$ , pero debido a que se detectaron medidas de presión inconsistentes en la bomba hidráulica, se decidió realizar el corte a

la mitad de dicha magnitud ( $\approx 0.40f_{pu}$ ). Los resultados se muestran en las tablas 6.24 y 6.25, y se ilustran en la figura 6.42, en donde se observa que los esfuerzos estimados siguen una tendencia que no es lineal.

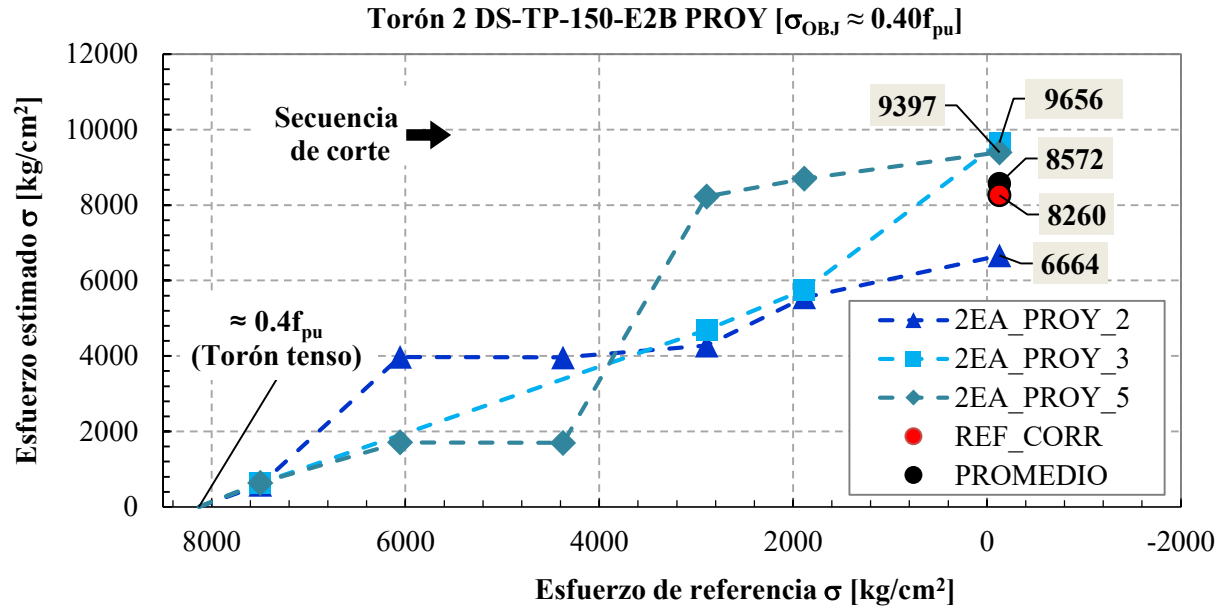


**Figura 6.42 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B)**

En la tabla 6.26 se presentan los esfuerzos estimados con la proyección de los *strain gages* 2, 3 y 5 aplicando las fórmulas de Machida y Durelli (1973). El promedio de los tres deformímetros sobreestimó en 4% el esfuerzo de referencia corregido. En la figura 6.43 se ilustran los resultados.

**Tabla 6.26 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2-DS-TP-150-E2B PROY)**

$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm²]					$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY [kg/cm²]	$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
1	2	3	4	5	2	3	5		
0	0	0	0	0	0	0	0	8572	104
591	580	633	615	635	7	8	8		
2409	3975	-	-	1709	48	-	-		
2401	3964	-	-	1698	48	-	-		
-	4273	4691	-	8226	52	57	100		
-	5552	5754	-	8698	67	70	105		
-	6664	9656	-	9397	81	117	114		



**Figura 6.43 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-150-E2B) PROY**

#### 6.6.4.2.2 Torón 1 DS-TP-250-E2B

Se utilizó un esfuerzo objetivo de  $\approx 0.80f_{pu}$ . Se colocó sólo un *strain gage* 2ET que no registró ningún dato y cinco *strain gages* 2EA de los cuales sólo tres registraron información, identificados como 1, 2 y 4 en las tablas 6.27 y 6.28. Dichos deformímetros, dejaron de medir a distintos pasos secuenciales.

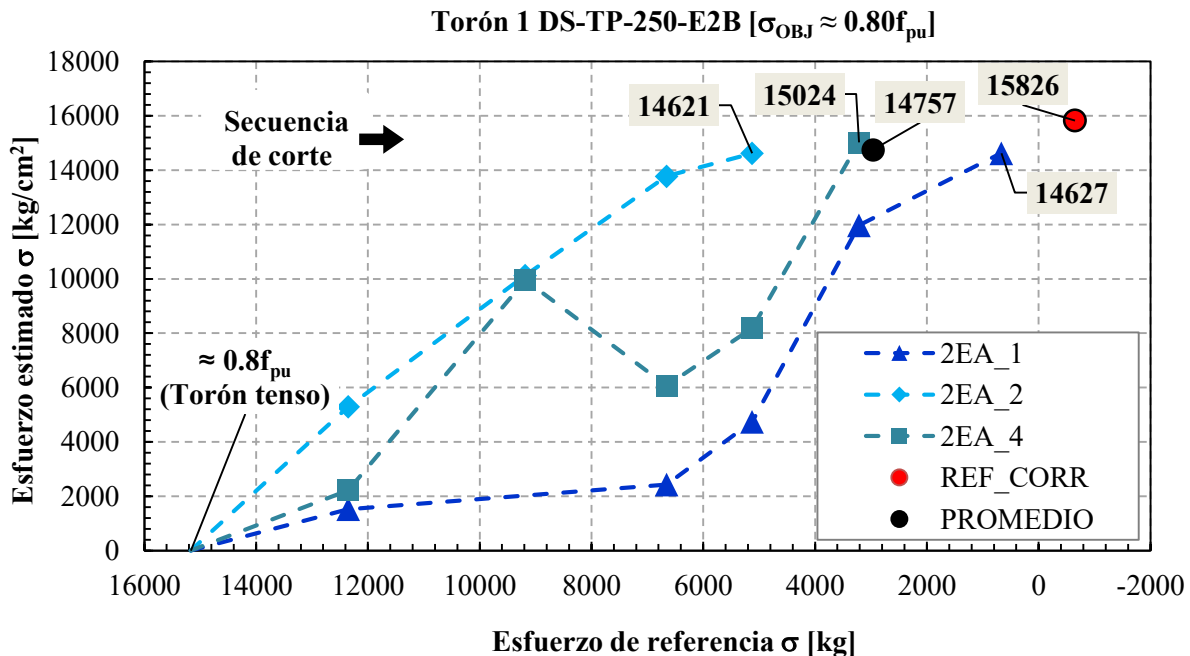
**Tabla 6.27 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.80f_{pu}$				
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Torón tenso	14972	15169	15826	0
1	12192	12352		-
2	9065	9184		-
3	6570	6657		-
4	5056	5123		--
5	3172	3214		-
6	659	668		-
7	-648	-657		-

**Tabla 6.28 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B**

$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]					$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}$ FINAL/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
	1	2	3	4	5	1	2	4		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	14757	93
-	1525	5293	-	2220	-	10	33	14		
-	-	10129	-	9957	-	-	64	63		
-	2432	13782	-	6064	-	15	87	38		
--	4746	14621	-	8191	-	30	92	52		
-	11974	-	-	15024	-	76	-	95		
-	14627	-	-	-	-	92	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Los deformímetros 1 y 2 subestimaron el esfuerzo de referencia corregido en 8%, y el deformímetro 4 en 5%. Obteniendo un promedio de estos tres deformímetros y comparando esta magnitud con el esfuerzo de referencia corregido, se subestima este último en 7%. Estos resultados se muestran en las tablas 6.27 y 6.28, y se ilustran en la figura 6.44.

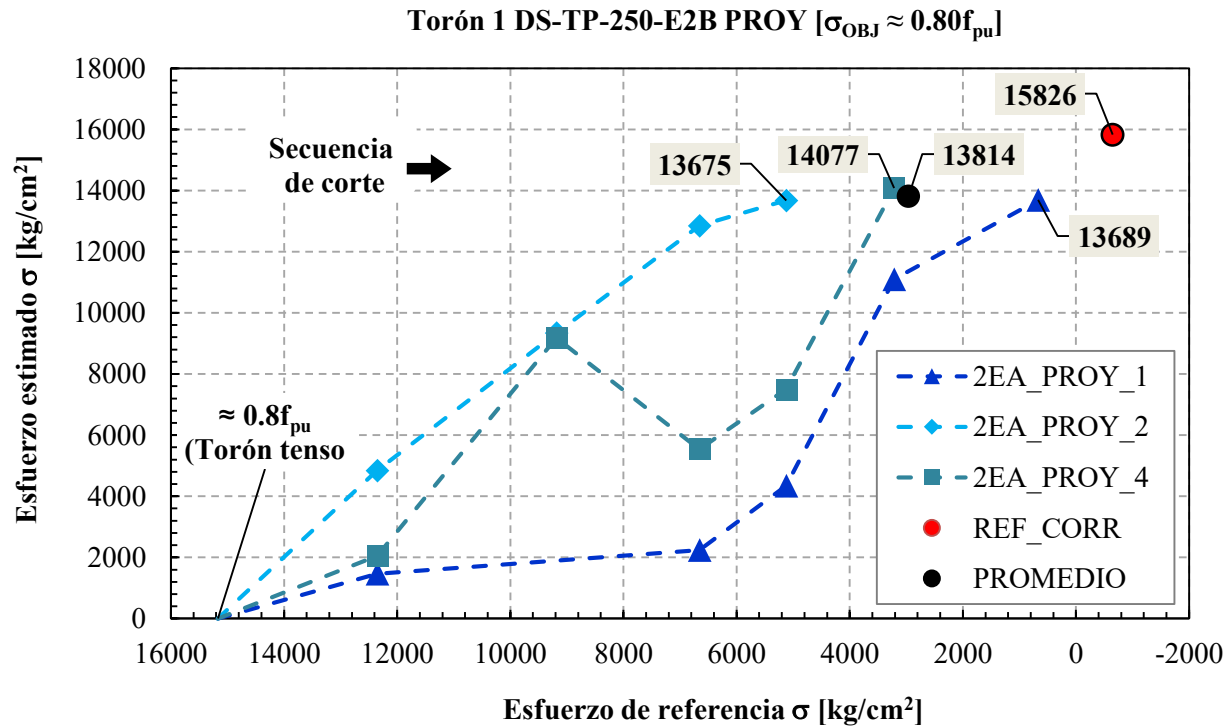


**Figura 6.44 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B)**

En la tabla 6.29 se presentan los esfuerzos estimados con la proyección de los *strain gages* 1, 2 y 4 aplicando las fórmulas de Machida y Durelli (1973). Al obtener el promedio de los tres deformímetros y compararlo con el esfuerzo de referencia corregido, este último se subestima en 13%. En la figura 6.45 se ilustran los resultados.

**Tabla 6.29 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B PROY)**

$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]					$\sigma_{2EA\_PROY} / \sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
1	2	3	4	5	1	2	4		
0	0	0	0	0	0	0	0	13814	87
1465	4841	-	2051	-	9	31	13		
-	9338	-	9174	-	-	59	58		
2240	12847	-	5541	-	14	81	35		
4345	13675	-	7502	-	27	86	47		
11102	-	-	14077	-	70	-	89		
13689	-	-	-	-	86	-	-		
-	-	-	-	-	-	-	-		



**Figura 6.45 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 1 DS-TP-250-E2B PROY)**

#### 6.6.4.2.2 Torón 2 DS-TP-250-E2B

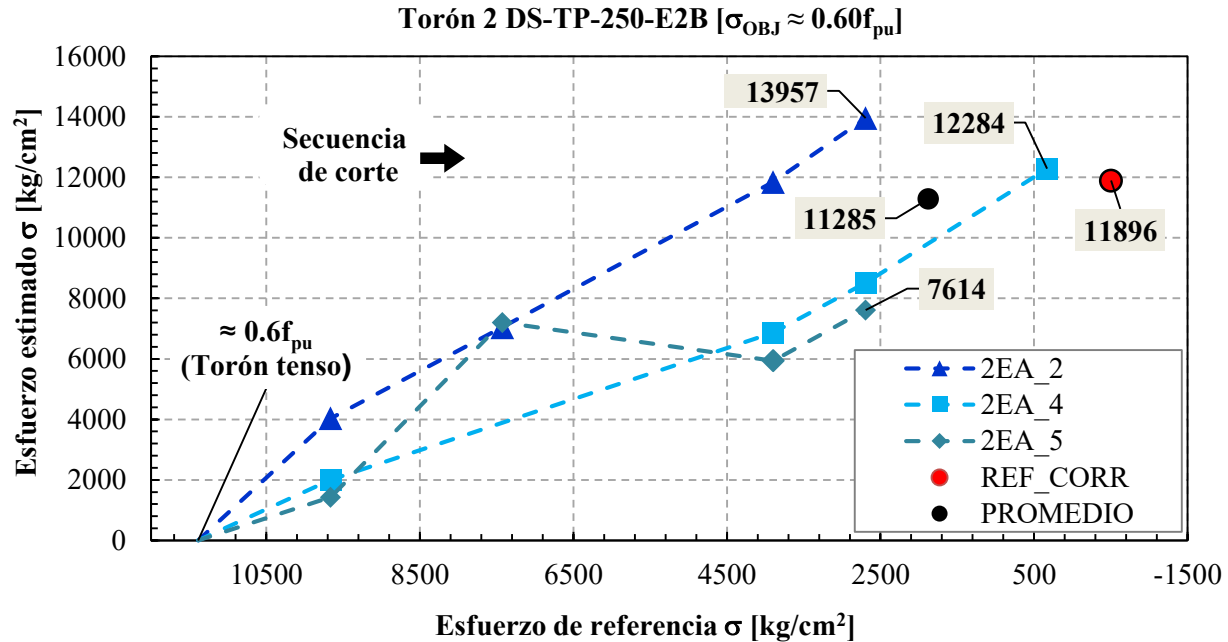
En esta prueba se tuvo un esfuerzo objetivo de  $\approx 0.60f_{pu}$ . Se colocó sólo un *strain gage* 2ET que dejó de medir después del segundo paso de corte y cinco *strain gages* 2EA de los cuales sólo tres registraron información a distintos pasos secuenciales, se identifican como 2, 4 y 5 en las tablas 6.30 y 6.31. Los *strain gages* 2 y 4 sobreestimaron el esfuerzo de referencia corregido en 17% y 3%, respectivamente. El *strain gage* 5 lo subestimó en 36%. Al obtener un promedio de estos tres deformímetros y comparar esta magnitud con el esfuerzo de referencia corregido, se subestima este último en 5%. Estos resultados se muestran en las tablas 6.30 y 6.31, y se ilustran en la figura 6.46.

**Tabla 6.30 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$				
Secuencia de corte	$P_{REF}$ [kg]	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	$\sigma_{REF\_CORR}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $\sigma_{REF} + \sigma_{PRECARGA}$	$\sigma_{2ET}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
Torón tenso	11238	11386	11896	0
1	9536	9661		1732
2	7329	7425		-
3	3847	3898		-
4	2657	2692		-
5	326	330		-
6	-502	-509		-

**Tabla 6.31 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte B**

$\sigma_{2EA}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]					$\sigma_{2EA}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}$ FINAL/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
1	2	3	4	5	2	4	5		
0	0	0	0	0	0	0	0	11285	95
2646	4038	-	2003	1431	34	17	12		
1005	7047	-	-	7203	59	-	61		
-	11844	-	6867	5941	100	58	50		
-	13957	-	8521	7614	117	72	64		
-	-	-	12284	-	-	103	-		
-	-	-	-	-	-	-	-		

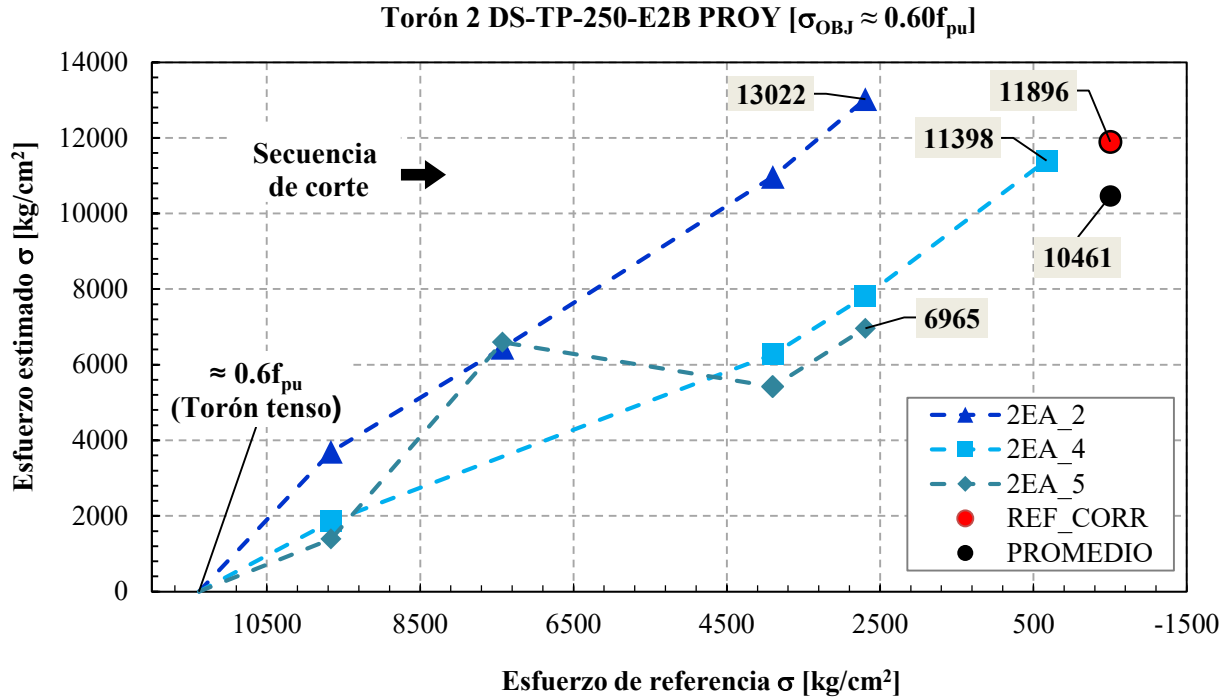


**Figura 6.46 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B)**

Al hacer la proyección del *strain gage* 2EA y estimar los esfuerzos, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 6.32. Al obtener el promedio de los tres y compararlo con el esfuerzo de referencia corregido, este último se subestima en 12%. En la figura 6.47 se ilustran los resultados.

**Tabla 6.32 Resumen del cálculo de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B PROY)**

$\sigma_{2EA\_PROY}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]					$\sigma_{2EA\_PROY}/\sigma_{REF\_CORR}$ [%]			$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{PROM}$ FINAL_PROY/ $\sigma_{REF\_CORR}$ [%]
1	2	3	4	5	2	4	5		
0	0	0	0	0	0	0	0	10461	88
2434	3697	-	1855	1389	31	16	12		
998	6446	-	-	6597	54	-	55		
-	10970	-	6274	5418	92	53	46		
-	13022	-	7811	6965	109	66	59		
-	-	-	11398	-	-	96	-		
-	-	-	-	-	-	-	-		



**Figura 6.47 Representación gráfica de esfuerzos (Torón 2 DS-TP-250-E2B PROY)**

#### 6.6.4.3 Comentarios

En lo que respecta a la etapa 2A, a pesar de utilizar sólo dos *strain gages* se logró que en todos los casos, por lo menos, uno de ellos midiera hasta el final del proceso de corte. En las tres pruebas realizadas, se sobreestimó el esfuerzo de referencia, pero tomando en cuenta que la máxima diferencia que se tuvo fue de 6% como se aprecia en la tabla 6.33, se considera que el nivel de estimación logrado mediante criterios prácticos resulta adecuado. La magnitud del esfuerzo de tensado antes de realizar el corte en los tres casos fue similar.

**Tabla 6.33 Resumen de estimación de esfuerzos en Etapa 2A**

Especimen	$\sigma_{OBJ}$	2ET	2EA
		[%]	[%]
Torón 1 DS-TP-150-E2A	$\approx 0.60f_{pu}$	-	103
Torón 1 DS-TP-300-E2A	$\approx 0.60f_{pu}$	106	-
Torón 2 DS-TP-300-E2A	$\approx 0.70f_{pu}$	-	104

En cuanto a la etapa 2B, el haber colocado *strain gages* en los seis alambres que rodean el alambre central enriqueció la información disponible para el análisis. Sin embargo, dado que no todos lograron registrar hasta el final, la dispersión entre los resultados es notoria de acuerdo con el coeficiente de variación, CV, reportado en la tabla 6.34. No obstante, en este trabajo se decidió



utilizar el promedio de los tres *strain gages* para comparar dicha magnitud con el esfuerzo de referencia conocido.

Es importante resaltar, que el esfuerzo de tensado de la prueba que presentó la mayor variación en esta etapa ( $\approx 0.40f_{pu}$ ) es de prácticamente la mitad con respecto a las otras dos. Esto debido a que al instante de realizarla se presentaron incidencias con la bomba hidráulica que llevaron a tomar la decisión de realizar el corte a esa magnitud, inicialmente se pensaba llevar a  $0.80f_{pu}$ . Es muy probable que este esfuerzo no sea representativo de lo que se esperaría encontrar en campo. Sin embargo, el resultado se tomó en cuenta para el análisis.

A pesar de lo descrito en el párrafo anterior, de acuerdo con la tabla 6.34 se resume que la máxima diferencia que sobreestimó los esfuerzos fue de 13% y la máxima que los subestimó fue 7%. Por lo tanto, de acuerdo a estos resultados se concluye que la estimación lograda resulta apropiada.

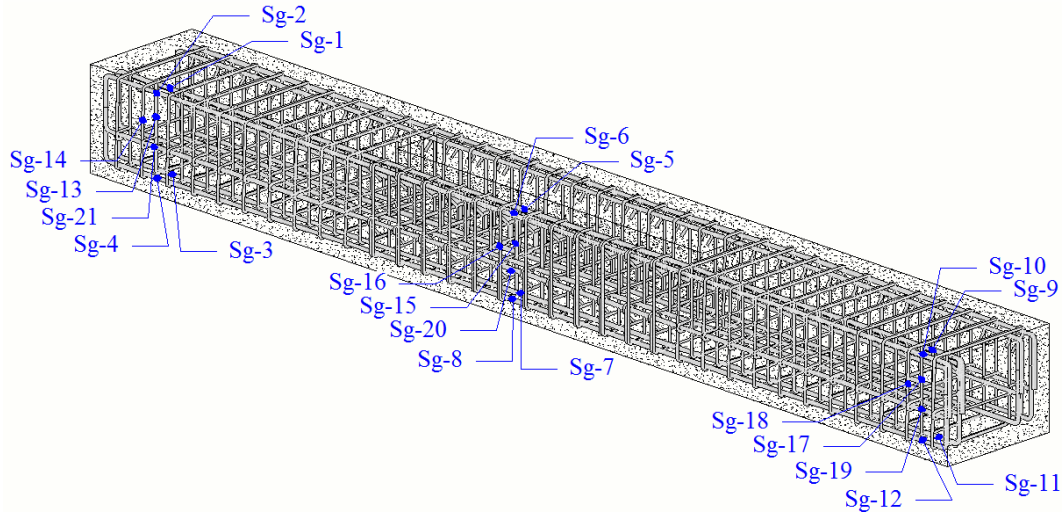
**Tabla 6.34 Resumen de estimación de esfuerzos en Etapa 2B**

Especimen	$\sigma_{OBJ}$	2ET	2EA					Prom. [%]	CV [%]
			1	2	3	4	5		
Torón 2 DS-TP-150-E2B	$\approx 0.40f_{pu}$	-	-	88	127	-	123	113	18.99
Torón 1 DS-TP-250-E2B	$\approx 0.80f_{pu}$	-	92	92	-	95	-	93	1.57
Torón 2 DS-TP-250-E2B	$\approx 0.60f_{pu}$	-	-	117	-	103	64	95	29.13

En ambas etapas (2A y 2B), las estimaciones de los esfuerzos obtenidas con la proyección de las deformaciones unitarias del *strain gage* 2EA aplicando las fórmulas de Machida y Durelli (1973) subestimaron los esfuerzos de referencia. La máxima diferencia que se obtuvo en la etapa 2A fue de 4% y en la etapa 2B de 13%.

## 6.7 DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO

Para tener conocimiento de las condiciones del acero de refuerzo, durante todas las pruebas realizadas se midieron las deformaciones unitarias en el acero de refuerzo longitudinal y transversal, y se compararon con la deformación unitaria de fluencia promedio que se obtuvo en el ensayo normativo de probetas de control. Como se describió en el capítulo 3, los *strain gages* se colocaron durante la construcción de los modelos de ensaye siguiendo la numeración que se ilustra en la figura 6.48.



**Figura 6.48 Ubicación de *strain gages* en el acero de refuerzo**

En cada modelo de ensaye se colocaron 21 *strain gages* identificados como “Sg” (figura 6.48). En esta sección se presentan las deformaciones unitarias medidas en la prueba Torón 1 DS-TP-250-E2B, cuyos resultados se muestran en las tablas 6.35 y 6.36. Los resultados del resto de las pruebas se presentan en el apéndice G.

La deformación unitaria de fluencia promedio que se obtuvo en las pruebas de tensión de acero de refuerzo fue de 0.00261 mm/mm (apéndice E). En cuanto a los resultados que se presentan en las tablas 6.35 y 6.36, la mayor deformación unitaria (0.000106 mm/mm) se registró en el Sg-6 ubicado en el centro del claro cuando se llegó al esfuerzo de 15169 kg/cm<sup>2</sup>. Por lo tanto, se concluye que las deformaciones unitarias medidas en el acero de refuerzo estuvieron muy por debajo con respecto a la de fluencia. Lo mismo ocurrió en el resto de las pruebas, las deformaciones unitarias inducidas al acero de refuerzo siempre estuvieron alejadas de la de fluencia.

**Tabla 6.35 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.80f_{pu}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	Sg-1	Sg-2	Sg-3	Sg-4	Sg-5 [%]	Sg-6	Sg-7	Sg-8	Sg-9	Sg-10	
Torón tenso	15169	-0.0056	-0.0056	0.0010	0.0010	-0.0103	<b>-0.0106</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0015</b>	-0.0063	-0.0050	
1	12352	-0.0045	-0.0044	0.0009	0.0009	-0.0080	-0.0089	0.0013	0.0013	-0.0052	-0.0042	
2	9184	-0.0033	-0.0033	0.0008	0.0008	-0.0058	-0.0068	0.0010	0.0010	-0.0039	-0.0031	
3	6657	-0.0024	-0.0024	0.0006	0.0006	-0.0039	-0.0050	0.0008	0.0008	-0.0028	-0.0023	
4	5123	-0.0023	-0.0020	0.0005	0.0006	-0.0027	-0.0039	0.0007	0.0007	-0.0023	-0.0018	
5	3214	-0.0009	-0.0009	0.0004	0.0004	-0.0016	-0.0025	0.0005	0.0004	-0.0014	-0.0010	
6	668	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002	0.0002	-0.0005	0.0002	0.0001	-0.0003	-0.0001	
7	-657	0.0007	0.0007	0.0002	0.0002	0.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	

**Tabla 6.36 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.80f_{du}$													
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]												
	$P_{REF}/A$	Sg-11	Sg-12	Sg-13	Sg-14	Sg-15	Sg-16	Sg-17	Sg-18	Sg-19	Sg-20	Sg-21	
		[%]											
Torón tenso	15169	0.0008	0.0011	0.0009	0.0011	0.0008	0.0012	0.0007	0.0006	-0.0007	-0.0007	-0.0015	
1	12352	0.0009	0.0010	0.0008	0.0010	0.0007	0.0010	0.0005	0.0006	-0.0005	-0.0003	-0.0011	
2	9184	0.0007	0.0008	0.0007	0.0008	0.0004	0.0008	0.0005	0.0004	-0.0004	0.0001	-0.0009	
3	6657	0.0005	0.0007	0.0006	0.0008	0.0003	0.0006	0.0003	0.0004	-0.0002	0.0004	-0.0007	
4	5123	0.0004	0.0006	0.0005	0.0007	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003	-0.0001	0.0005	-0.0006	
5	3214	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0001	0.0003	-0.0001	0.0005	-0.0004	
6	668	0.0001	0.0002	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	-0.0001	0.0006	-0.0001	
7	-657	0.0000	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0007	-0.0077	-0.0002	

De acuerdo con las tablas 6.35 y 6.36, los *strain gages*: Sg-1, Sg-2, Sg-5, Sg-6, Sg-9, Sg-10, Sg-19, Sg-20 y Sg-21 indican que el acero de refuerzo se encontró en compresión y los restantes en tensión.

Aprovechando el modelo de elementos finitos elaborado en ANSYS durante la etapa de diseño (capítulo 3). Se simuló la prueba Torón 1 DS-TP-250-E2B tensando únicamente el torón superior, tomando en cuenta como condiciones iniciales que los torones inferiores ya se encontraban tensos y que el efecto del peso propio ya se había dado. Además, se consideraron las propiedades de los materiales que se obtuvieron en las diversas pruebas que se realizaron (apéndice E). En los elementos del modelo se identificaron los puntos donde se colocaron *strain gages*, y de acuerdo con los esfuerzos principales se especificó si correspondía a tensión o compresión. Por último, para obtener las deformaciones unitarias se dividieron los esfuerzos entre el módulo de elasticidad.

Las deformaciones unitarias obtenidas en el modelo y las medidas experimentalmente se comparan en la tabla 6.37.

**Tabla 6.37 Comparación de deformaciones unitarias  
(Torón 1 DS-TP-250-E2B)**

No.	Modelo ANSYS	Experimental
	$\varepsilon \%$ [mm/mm]	$\varepsilon \%$ [mm/mm]
Sg-1	-0.0061	-0.0056
Sg-2	-0.0032	-0.0056
Sg-3	0.0005	0.0010
Sg-4	0.0008	0.0010
Sg-12	0.0007	0.0011
Sg-14	0.0005	0.0011
Sg-21	-0.0018	-0.0015
Sg-5	-0.0093	-0.0103
Sg-6	-0.0093	-0.0106
Sg-7	0.0012	0.0015
Sg-8	0.0012	0.0015
Sg-15	0.0007	0.0008
Sg-16	0.0008	0.0012
Sg-20	-0.0033	-0.0007

En cuanto a magnitudes se aprecian buenas aproximaciones, excepto en el *strain gage* 20 donde la diferencia es mayor. Sin embargo, los puntos en donde se midió compresión experimentalmente, coinciden con el modelo, el cual también indico compresión.

## 6.8 COMENTARIOS

Las estimaciones logradas en el destentado controlado tuvieron en general muy buena precisión. Sin embargo, debido a las condiciones que normalmente existen en estructuras presforzadas que se encuentran en operación, la técnica de destensado que se considera con mayor probabilidad de efectuarse en campo es la de destensado súbito. De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo aplicando dicha técnica, se concluye que estimar el esfuerzo efectivo de presfuerzo en estructuras existentes a partir de la medición de deformaciones unitarias utilizando *strain gages* permite tener niveles de estimación aceptables desde un criterio práctico, con la posibilidad de estimar el esfuerzo efectivo con una diferencia no mayor a 13%.

En cuanto a la instrumentación, a causa de que las mediciones con los transductores de desplazamiento fueron incorrectas realizando el destensado súbito, la recomendación es que se

utilicen *strain gages* y se coloquen en los seis alambres helicoidales del torón tomando en cuenta que de esta forma existe mayor redundancia de la información al concluir el proceso de corte, incluso podría considerarse colocar seis *strain gages* en dos puntos distintos del torón. Asimismo, colocarlos orientados longitudinalmente de acuerdo al eje de un alambre helicoidal proporciona mejores resultados, existe menos probabilidad de que se desprenda y, además, permite la aplicación de las fórmulas de Machida y Durelli (1973).

En lo que respecta a la longitud de instrumentación, no se observaron diferencias sustanciales en las estimaciones de las tres longitudes evaluadas, por lo tanto, se considera que instrumentar una longitud equivalente a 100 cm es suficiente para tener resultados confiables.

En cuanto a las deformaciones unitarias que se midieron en el acero de refuerzo durante la ejecución de las pruebas, en todos los casos, las magnitudes máximas estuvieron muy por debajo con respecto a la deformación unitaria de fluencia obtenida experimentalmente.

Para poder llevar a la práctica la metodología desarrollada, se considera necesario realizar pruebas preliminares en campo para identificar las necesidades y ajustes que facilitarían e impulsarían su aplicación. Por ejemplo, definir la técnica más viable para descubrir el torón y poder llevar a cabo su instrumentación, así como definir la técnica que permita restituir eficientemente la muestra de torón de tal forma de mantener la fuerza de tensión original.

Por último, es importante resaltar que los resultados de este trabajo están acotados a estructuras presforzadas con torones desadheridos. No obstante, dando continuidad a este trabajo podría definirse una metodología aplicable a torones adheridos.

## **6.9 REFERENCIAS**

1. Costello, G A (1997), Theory of wire rope, 2nd Edition, Springer-Verlag New York Inc.
2. Durelli, A J, S Machida y C J Parks (1972), “Strains and Displacements on a Steel Wire Strand”, Naval Engineers Journal, Vol. 84, No. 6, pp. 85-93.
3. Machida, S y A J Durelli (1973), “Response of a Strand to Axial and Torsional Displacements”, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 15, No. 4, pp. 241-251.
4. Naaman, A E (2004), Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals, 2nd Edition, Techno Press, 3000, Michigan, USA.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

El problema de investigación planteado en este trabajo fue evaluar la fuerza de tensión remanente en torones de acero presforzados en estructuras existentes. El método seleccionado fue instrumentar con medidores de deformación un tramo de torón, descargarlo, medir su acortamiento y a partir de esta medición, calcular el esfuerzo actuante antes de la descarga. Para tal fin, se construyeron tres trabes de concreto postensado que fueron utilizadas en este trabajo como modelos de ensaye, su diseño se realizó utilizando el programa Concice Beam. Además, debido a la irregularidad de su geometría y a la magnitud de las fuerzas que estarían actuando en ellos, se desarrolló un modelo más elaborado de análisis no lineal en el programa ANSYS que permitió tener mayor conocimiento sobre su comportamiento; principalmente del estado de esfuerzos en el concreto.

Se realizaron pruebas de tensión de 25 especímenes de presfuerzo. Cada espécimen se instrumentó con un LVDT y tres *strain gages* (2EA, 2ET y 1ET), por lo que para cada uno se obtuvieron cuatro curvas esfuerzo-deformación (una por cada dispositivo). A partir de las curvas, se calcularon: el módulo de elasticidad, la resistencia de ruptura, la resistencia de fluencia y la elongación.

Asimismo, para cada dispositivo de medición (LVDT, 2EA, 2ET y 1ET) se obtuvo la curva esfuerzo-deformación promedio. Las curvas promedio obtenidas con los *strain gages* se consideran representativas de los alambres helicoidales y la curva promedio obtenida con el LVDT representativa del torón. A partir de esta última, se propuso un modelo constitutivo del acero de presfuerzo, útil para el diseño de elementos de concreto presforzado que utilicen acero de las mismas características que el considerado en este trabajo. Al comparar el modelo constitutivo propuesto con el recomendado por el PCI (2004) se observó una buena correlación, principalmente, en la parte lineal y en deformaciones unitarias mayores a 0.04 mm/mm para la parte no lineal. Además, se proporcionaron ecuaciones que permiten reproducir las curvas promedio experimentales de los cuatro dispositivos de medición.

Se estimó el esfuerzo efectivo de especímenes de presfuerzo en campo. Para ello, se tensaron a distintos esfuerzos (en su mayoría entre  $0.6f_{pu}$  y  $0.8f_{pu}$ , en el intervalo elástico) y se destensaron primero de forma controlada con el apoyo de un gato monotorón y una bomba hidráulica, y después súbitamente con equipo de corte. En estos procesos, se midió la deformación unitaria a través de *strain gages* colocados en los alambres helicoidales de los torones y con transductores de desplazamiento que también se fijaron a los torones. Las deformaciones unitarias medidas se relacionaron con los esfuerzos de tensión correspondientes a través de las curvas esfuerzo-deformación promedio obtenidas experimentalmente. Los esfuerzos obtenidos a través de las deformaciones unitarias se compararon con los esfuerzos de referencia o efectivos, conocidos por

medio de un gato monotorón y dos celdas de carga que se ubicaron en los extremos de los modelos de ensaye.

En las pruebas que se realizaron destensando el torón de forma controlada tanto los transductores de desplazamiento como los *strain gages* resultaron aptos para estimar la fuerza efectiva de presfuerzo con buena precisión. Los transductores fueron los que mejor estimación de esfuerzos tuvieron con respecto a los esfuerzos de referencia, en la mayoría de los casos, la diferencia entre ellos no excedió el 1%. En cuanto a los *strain gages*, a pesar de que fueron menos precisos tuvieron poca dispersión en sus estimaciones, por lo que los resultados se consideran favorables dado que la diferencia máxima entre los esfuerzos estimados y los de referencia no excedió el 6%.

Sin embargo, la técnica de destensado que tiene mayor posibilidad de efectuarse en campo es la de destensado súbito, de la cual se concluye que estimar el esfuerzo efectivo de presfuerzo en estructuras existentes a partir de la medición de deformaciones unitarias utilizando *strain gages*, permite tener niveles de estimación aceptables desde un criterio práctico, con la posibilidad de estimar el esfuerzo efectivo con una diferencia no mayor a 13%. En este tipo de destensado, no se estimaron los esfuerzos con los transductores de desplazamiento debido a que no se lograron medir correctamente las deformaciones unitarias con estos dispositivos.

En ambas técnicas de destensado, las estimaciones de los esfuerzos obtenidas con la proyección de las deformaciones unitarias medidas en un alambre helicoidal aplicando las fórmulas de Machida y Durelli (1973) subestimaron los esfuerzos de referencia. En el destensado controlado la diferencia máxima entre los esfuerzos estimados y los de referencia no excedió el 8%, y en el destensado súbito el 13%.

En lo que respecta a la longitud de instrumentación, no se observaron diferencias significativas en las estimaciones de las tres longitudes evaluadas (100 cm, 200 cm y 250 cm). Por lo tanto, se considera que instrumentar una longitud equivalente a 100 cm es suficiente para tener resultados confiables.

Para asegurarse que las condiciones del acero de refuerzo ordinario de los modelos de ensaye eran apropiadas, se midieron las deformaciones unitarias que se le indujeron durante la ejecución de las pruebas. Como resultado, en todas ellas las magnitudes medidas fueron muy pequeñas en comparación con la deformación unitaria de fluencia obtenida experimentalmente.

Además, se determinaron las propiedades mecánicas reales del concreto y el acero de refuerzo a través de distintas pruebas. En todos los casos, las magnitudes obtenidas fueron mayores que las nominales.

Por último, es importante resaltar que los resultados de este trabajo están limitados a estructuras presforzadas con torones desadheridos de baja relajación.

## 7.2 RECOMENDACIONES

Para enriquecer los resultados de esta investigación se recomienda lo siguiente:

1. Realizar pruebas preliminares en estructuras reales, en donde se identifiquen las necesidades y ajustes que faciliten la aplicación de la metodología desarrollada. Entre lo más importante, es que defina la técnica más viable para descubrir el torón en aquellos casos en donde no se encuentre expuesto para realizar su instrumentación y extracción, así como se determine la técnica más eficiente para restablecer las muestras de torón que serán extraídas, con el propósito de mantener la fuerza de tensión del presfuerzo en los elementos y no se alteren sus condiciones de trabajo.

No obstante, en las NTCC (2004) se menciona que cuando en un elemento de concreto presforzado se rompa un tendón, y sin su reposición, la fuerza de presfuerzo no disminuya en más del 2% de la fuerza total, así puede quedarse. Por lo tanto, podrían existir estructuras con un grado de seguridad convencional (por ejemplo, viviendas, oficinas y estructuras urbanas) en las cuales se aplique la metodología desarrollada y no sea necesaria la reposición del torón.

2. Utilizar *strain gages* para medir las deformaciones unitarias en los seis alambres helicoidales del torón, de ser posible, en dos puntos distintos del torón. Asimismo, colocarlos orientados longitudinalmente de acuerdo al eje de un alambre helicoidal ya que proporciona mejores resultados, existe menos probabilidad de que se desprenda y es posible la aplicación de las fórmulas de Machida y Durelli (1973).
3. Realizar pruebas de tensión de los torones evaluados en campo para determinar curvas esfuerzo-deformación reales que puedan ser utilizadas en la estimación de los esfuerzos.
4. Estudiar otros métodos como los presentados en el capítulo 2, especialmente el método de las cuerdas vibrantes para medir las deformaciones unitarias en conjunto con los *strain gages*, ya que en las pruebas de destensado súbito no se logró tener una sujeción adecuada entre los transductores de desplazamiento y el torón.
5. Dar continuidad a esta investigación considerando torones de relajación normal, así como otros diámetros comúnmente utilizados en la práctica del presfuerzo como son torones de 0.6" y 3/8".
6. Extender la metodología desarrollada a torones totalmente adheridos, alambres y barras de presfuerzo realizando pruebas que permitan determinar los ajustes correspondientes.



### **7.3 REFERENCIAS**

1. Machida, S y A J Durelli (1973), “Response of a Strand to Axial and Torsional Displacements”, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 15, No. 4, pp. 241-251.
2. NTCC (2004), “Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Distrito Federal, octubre, México.
3. PCI Design Handbook (2004), 6th Edition, Precast / Prestressed Concrete Institute.

## APÉNDICE A: MÉTODOS DE SUJECIÓN PROBADOS

En este apéndice, se describen los distintos métodos de sujeción que se probaron y los inconvenientes que se obtuvieron en sus resultados hasta encontrar el que proporcionó mejores resultados. Las curvas que aquí se presentan son carga-desplazamiento debido a que en la mayoría de estas pruebas de tensión sólo se obtuvieron datos de extensión y carga de la cruceta de la máquina universal.

### A.1 Prueba utilizando cuñas de 0.5" y placas de acuñamiento

Se utilizaron cuñas especiales de 0.5" y placas de acuñamiento (figura A.1a). Al realizar la prueba, las cuñas comprimieron localmente un alambre hasta llevarlo a la ruptura antes de llegar a la resistencia de tensión mínima requerida por las normas ( $183.7 \text{ kN} \approx 18732.19 \text{ kg}$ ). En la figura A.2 se muestran los resultados.



a) Cuñas y placa de acuñamiento



b) Ejecución y resultados de la prueba

Figura A.1 Método de sujeción utilizando cuñas y placas de acuñamiento

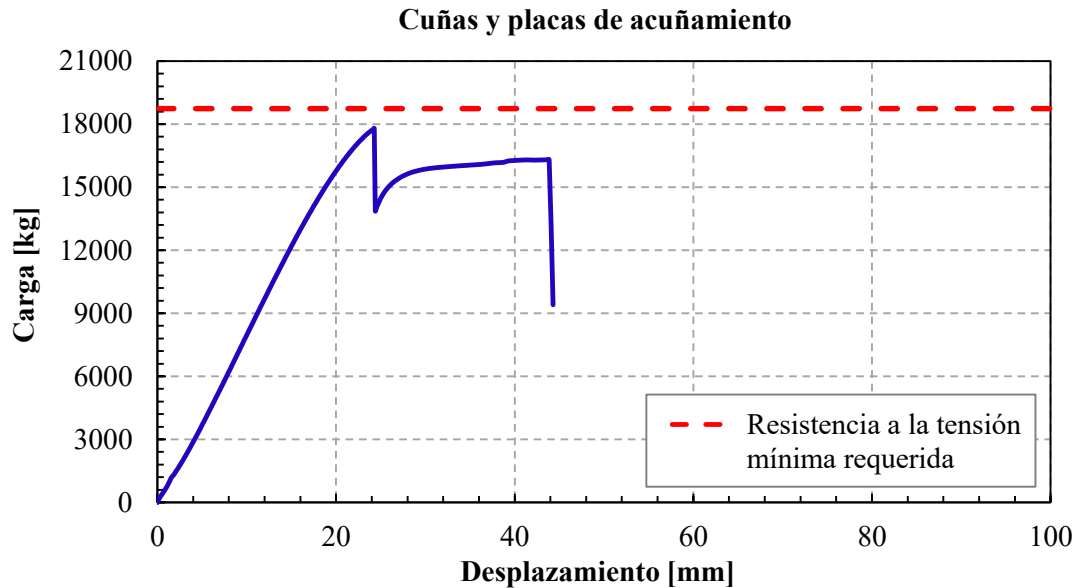


Figura A.2 Curva carga-desplazamiento utilizando cuñas y placas de acuñamiento

## A.2 Prueba utilizando mordazas de uso múltiple

Las mordazas constan de un barril, cuñas y un resorte, como se muestra en la figura A.3. En esta prueba se alcanzó la resistencia mínima requerida. Sin embargo, caso similar a la prueba anterior, la falla ocurrió en un extremo debido a que las cuñas comprimieron localmente un alambre hasta llevarlo a la ruptura como se muestra en la figura A.4



Figura A.3 Barril, cuñas y resorte de mordazas



Figura A.4 Ejecución de prueba utilizando mordazas de uso múltiple

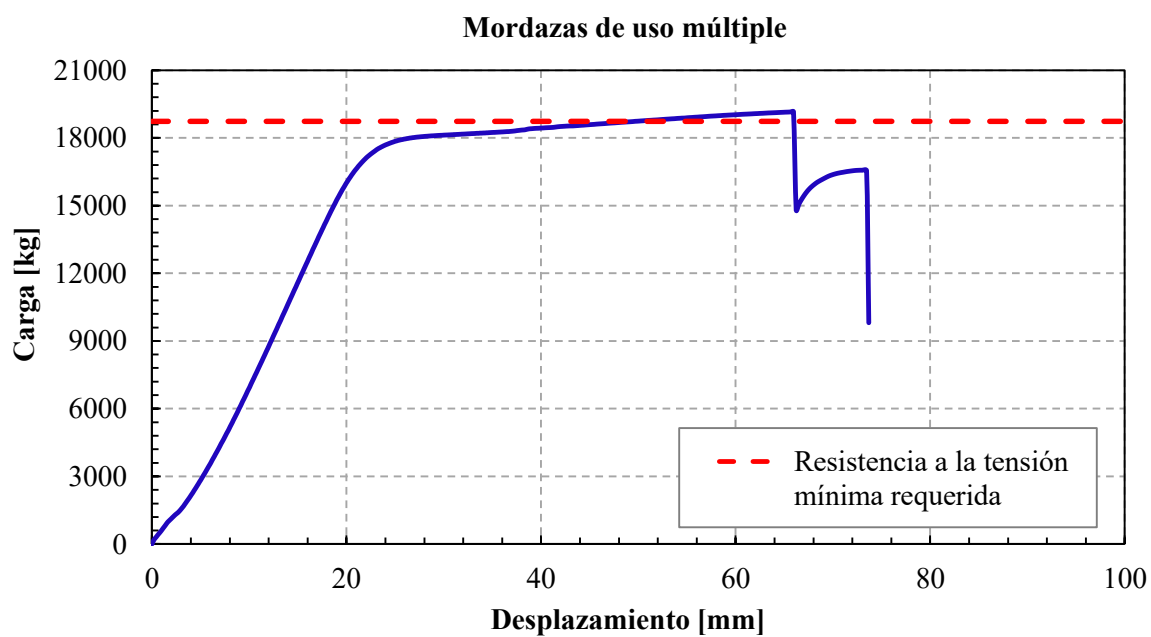


Figura A.5 Curva carga-desplazamiento utilizando mordazas de uso múltiple

### A.3 Prueba utilizando lámina de aluminio cal. 24

Al instante de iniciar la prueba, no hubo una buena sujeción de las mordazas de la máquina universal lo que causó que el torón se deslizara entre las láminas de aluminio y la prueba no pudiera concluirse.



Figura A.6 Método de sujeción empleando lámina de aluminio cal. 24

### A.4 Prueba utilizando tubo de aluminio abierto longitudinalmente y adherido al torón mediante adhesivo epóxico mezclado con óxido de aluminio

Debido a que con los métodos anteriores no se obtuvieron resultados del todo favorables, se recurrió a técnicas más elaboradas. La primera consistió en utilizar tubo de aluminio de 19.05 mm de diámetro, 1.65 mm de espesor y 250 mm de longitud, y se adhirió al torón mediante adhesivo epóxico marca DEVCON mezclado con óxido de aluminio grano 80 (figura A.7). Este método se basó en los trabajos realizados por Hill (2006) y Loflin (2008).

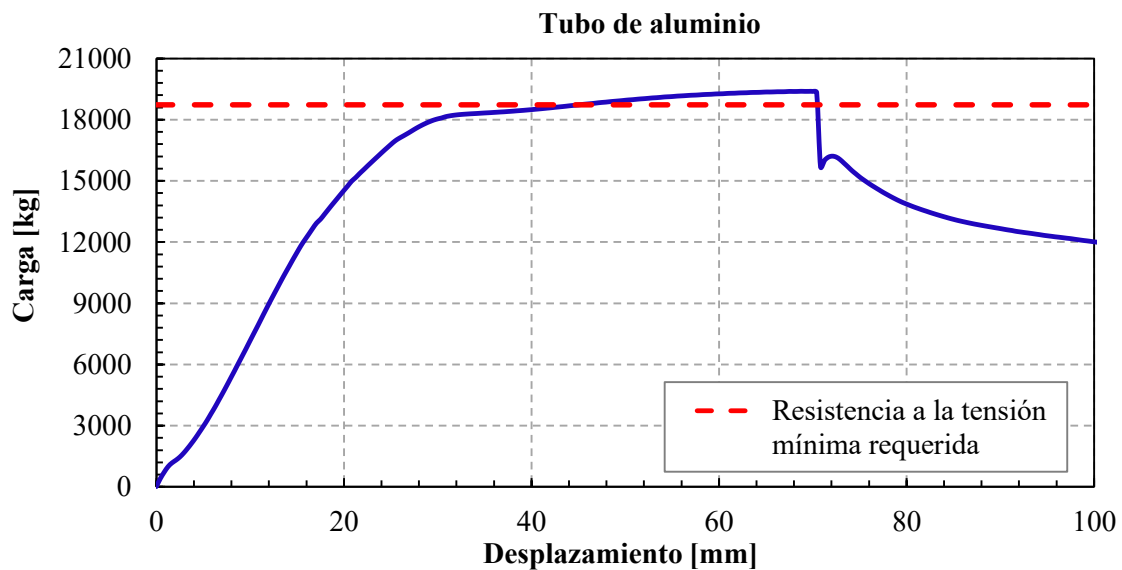


Figura A.7 Óxido de aluminio y adhesivo epóxico DEVCON



**Figura A.8 Método de sujeción utilizando tubo de aluminio y adhesivo epóxico**

En cuanto a la fuerza de tensión resistida por el espécimen, los resultados fueron favorables dado que se llegó a la resistencia de tensión mínima requerida de acuerdo a las normas ASTM A370 (2011) y NMX-B-292-CANACERO (2011) (figura A.9). Sin embargo, la falla ocurrió primero en un alambre en el interior del tubo, sin lograr la falla simultánea de todos los alambres. A pesar de haber cumplido con la resistencia mínima, se realizaron más pruebas intentando lograr la falla simultánea de todos los alambres del torón.



**Figura A.9 Curva carga-desplazamiento utilizando tubo de aluminio abierto**



### A.5 Prueba utilizando tubo de aluminio cerrado adherido al torón mediante distintos tipos de adhesivos epóxicos

Debido a que en la prueba anterior, utilizando tubo de aluminio en los puntos de sujeción se tuvieron buenos resultados, con la finalidad de perfeccionar la técnica se hizo nuevamente pero con el tubo cerrado, disminuyendo su longitud a 200 mm y colocando distintos tipos de adhesivos con mayor resistencia y, en algunos casos, mayor fluidez al utilizado en la prueba anterior (figura A.10).



a) Adhesivo epóxico plasti-acero SR1-56

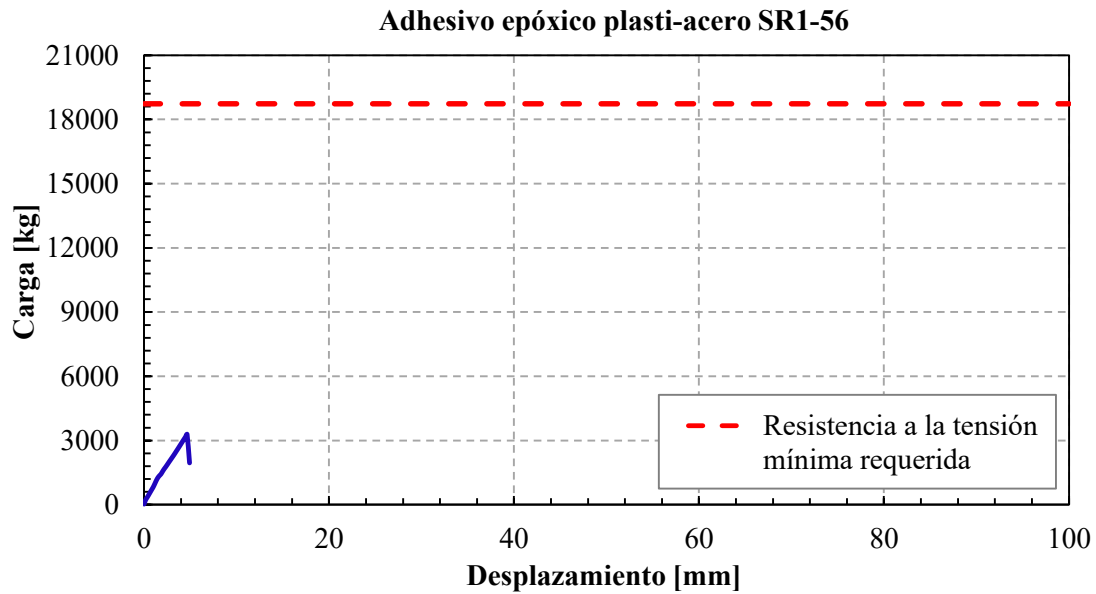


b) Adhesivo estructural KLIP-TON

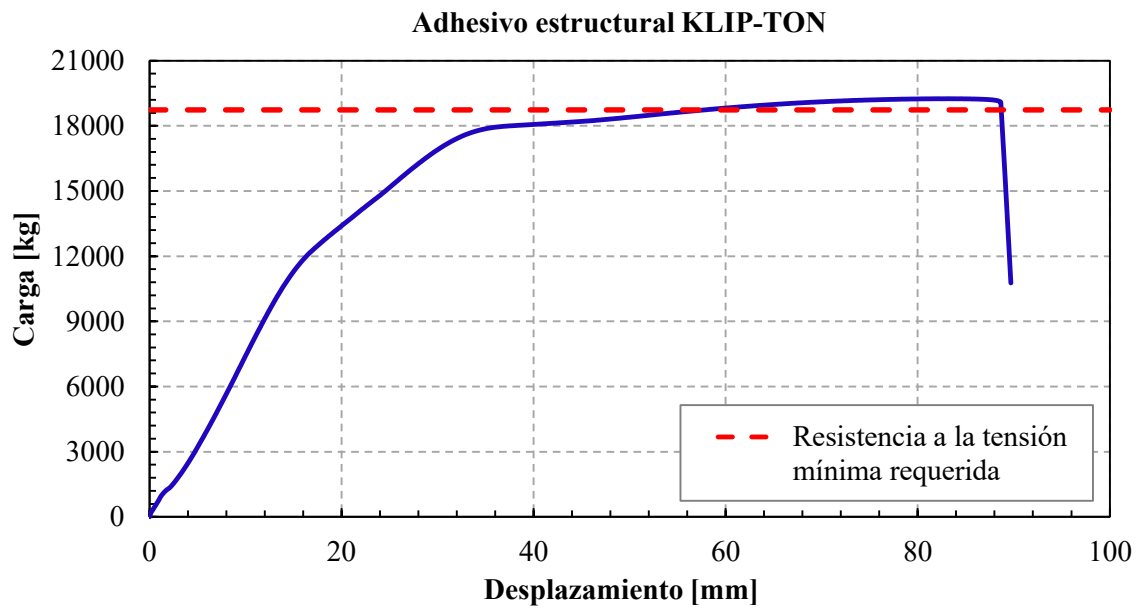


c) Adhesivo epóxico HIT-RE 500-SD

Figura A.10 Método de sujeción utilizando tubo de aluminio cerrado con distintos tipos de adhesivos

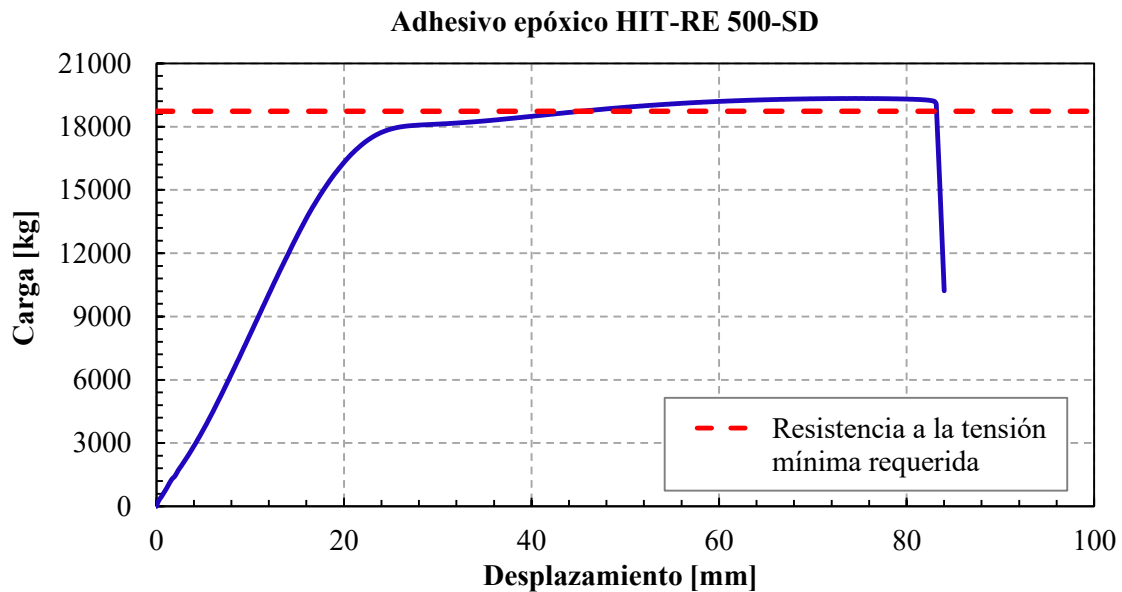


a) Adhesivo epóxico plasti-acero SR1-56



b) Adhesivo estructural KLIP-TON





**c) Adhesivo epóxico HIT-RE 500-SD**

**Figura A.11 Resultados de las pruebas utilizando distintos adhesivos**

En la prueba con el adhesivo estructural KLIP-TON se obtuvieron buenos resultados (figura A.11b). Sin embargo, al revisar detalladamente la curva carga-desplazamiento se observa que no presenta un suavizado bien definido. Por otro lado, la prueba con el adhesivo epóxico plasti-acero no se llevó acabo satisfactoriamente ya que hubo deslizamiento entre las mordazas y el tubo de aluminio a una carga de tensión baja (figura A.11a).

Finalmente, se logró tener el tipo de falla deseada con el adhesivo HIT-RE 500-SD de la marca HILTI (figura A.11c). Con este adhesivo se probaron dos especímenes, y ambos presentaron la falla simultánea en los siete alambres, sólo que en uno de ellos la falla ocurrió al centro del claro y en el otro, relativamente cerca de las mordazas inferiores. Por consiguiente, se procedió a preparar los torones para realizar las 25 pruebas utilizando este último método de sujeción.

## A.6 Tubo de aluminio cerrado adherido al torón utilizando adhesivo epóxico HRE-500 HILTI

Definidos el método de sujeción y el adhesivo epóxico a utilizar, se prepararon los torones para ser probados a tensión siguiendo el procedimiento que se ilustra en la figura A.12, en donde finalmente se utilizó el adhesivo de la marca Hilti.



a) Limpieza y colocación de oring en torones



b) Colocación de adhesivo HIT-RE 500-SD en los tubos de aluminio



c) Vibrado para reacomodar el adhesivo



d) Vibrado con el torón ya colocado y ajuste del oring



e) Etapa de secado



f) Lote de torones listos para ser ensayados

Figura A.12 Preparación de extremos de sujeción en torones de prueba

## A.7 REFERENCIAS

1. Loflin, B J (2008), “Bond and material properties of grade 270 and grade 300 prestressing strands”, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
2. Hill, A T (2006), “Material properties of the grade 300 and grade 270 prestressing strands and their impact on the design of bridges”, Master's Thesis, Virginia Polytechnic Institute.
3. NMX-B-292-CANACERO (2011), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria siderúrgica, “Torón de siete alambres sin recubrimiento con relevado de esfuerzos para concreto presforzado-especificaciones y métodos de prueba”, NMX-B-292-CANACERO-2011.
4. ASTM A416/A416M (2016), “Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete”, American Society for Testing and Materials (ASTM).
5. ASTM A370 (2011), “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”, Annex A7, American Society for Testing and Materials (ASTM).

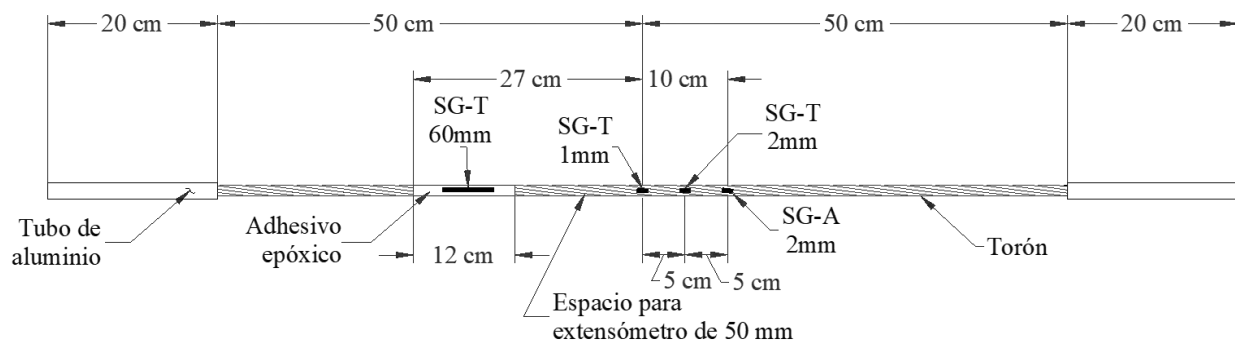
## APÉNDICE B: DEFINICIÓN DE MODELOS DE *STRAIN GAGES* PARA PRUEBAS DE Tensión

Fue necesario realizar pruebas preliminares para definir el arreglo y el tipo de *strain gage* a utilizar en las pruebas de tensión descritas en el capítulo 4. Para ello, se evaluaron tres distintos modelos de la marca TML Tokyo Sokki Kenkyujo, sus características se presentan en la tabla B.1.

**Tabla B.1 Características de *strain gages***

Características	YEFLA-2-5LT [SG-T 2 mm] [SG-A 2 mm]	PL-60-11-5LT [SG-T 60 mm]	FLA-1-11-5LT [SG-T 1 mm]
Longitud	2 mm	60 mm	1 mm
Ancho	1.8 mm	1 mm	1.1 mm
Factor	$2.16 \pm 2\%$	$2.13 \pm 1\%$	$2.14 \pm 1\%$
Resistencia	$119.5 \pm 0.5 \Omega$	$120 \pm 0.5 \Omega$	$120 \pm 0.5 \Omega$
Sensibilidad transversal	0.0 %	0.8 %	1.1 %

Los *strain gages* se colocaron alineando su lado más largo con el eje longitudinal del torón (SG-T 2 mm, SG-T 60 mm y SG-T 1 mm), y sólo el modelo YEFLA-2-5LT se repitió colocándose también alineado con el eje de uno de los alambres que rodean al alambre central (SG-A 2 mm). El arreglo de ésta instrumentación se detalla en la figura B.1.



**Figura B.1 Distribución de *strain gages***

Debido a las dimensiones del *strain gage* SG-T 60, fue necesario colocar adhesivo epóxico sobre el torón de tal forma de contar con una superficie lisa que permitiera y facilitara su colocación. Para determinar el tipo de adhesivo a utilizar, se hicieron dos pruebas de tensión utilizando los adhesivos KLIP-TON y DEVCON.

En la figura B.2 se muestra el procedimiento que se siguió para la colocación del adhesivo KLIP-TON y la curva carga-desplazamiento que se obtuvo se muestra en la figura B.3.



**a) Colocación del adhesivo KLIP-TON**

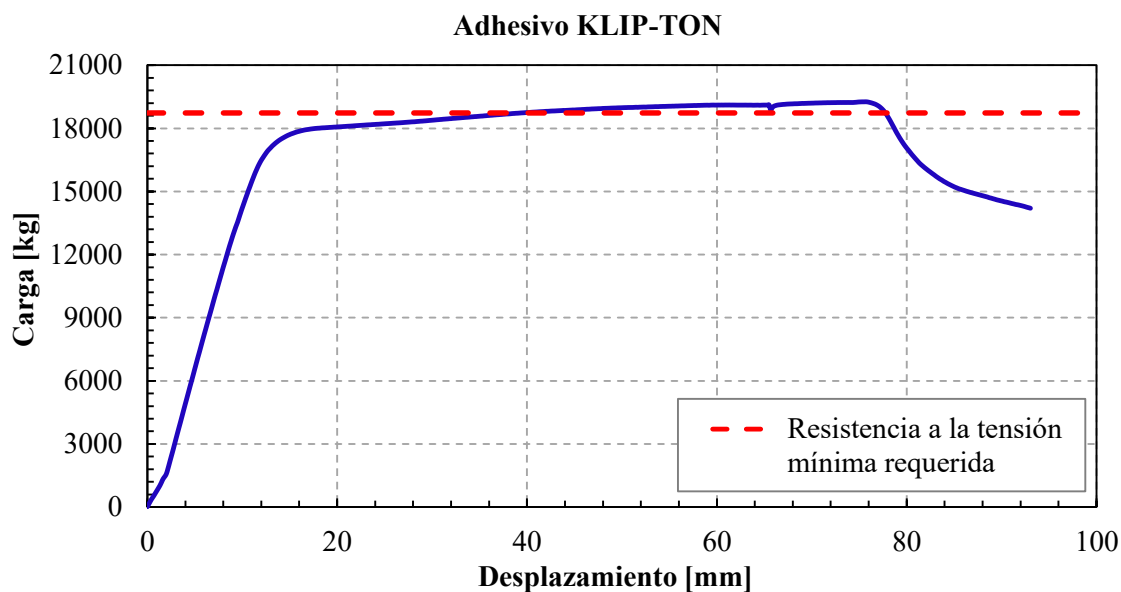


**b) Instrumentación y ejecución de la prueba**

**Figura B.2 Procedimiento para la colocación del adhesivo KLIP-TON**

Durante la prueba, a una carga aproximada de 15000 kg se detectó que el intervalo de tiempo de registro entre los deformímetros y el extensómetro de la máquina universal era distinto, por lo que se tuvo que reiniciar la prueba. El repetirla ocasionó que el torón se deslizara en los puntos de sujeción evitando llegar a su ruptura aunque cumplió con la resistencia mínima requerida, por eso al final de la curva de la figura B.3 no se observa una caída súbita.





**Figura B.3 Curva carga-desplazamiento obtenida con el adhesivo KLIP-TON**

En lo que respecta al adhesivo DEVCON, el procedimiento de su colocación se muestra en la figura B.4 y su curva carga-desplazamiento en la figura B.5.

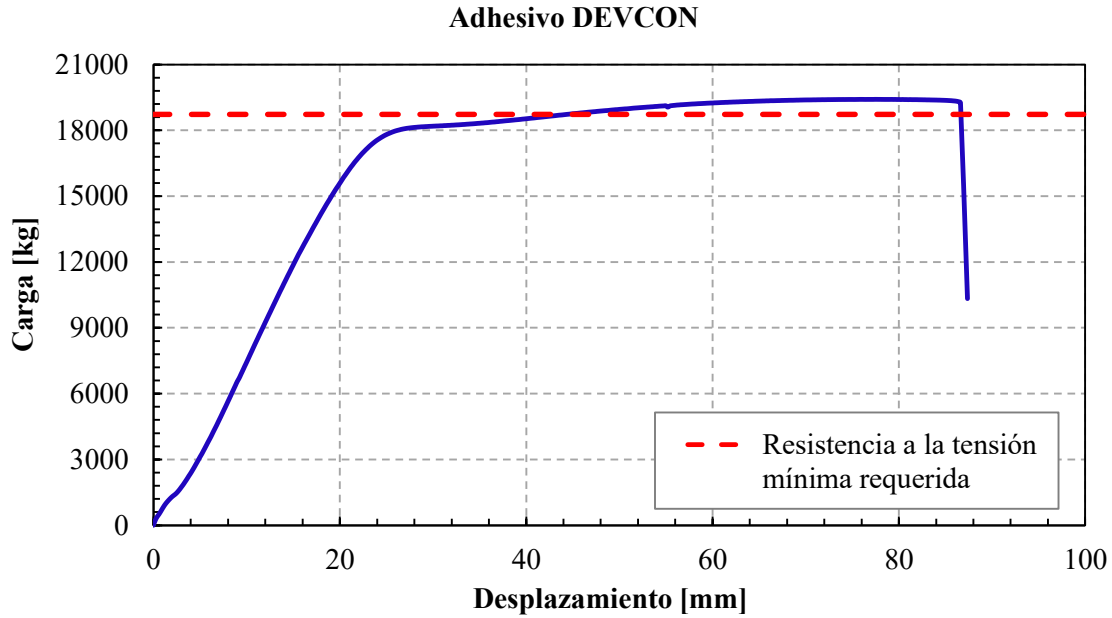


**a) Colocación del adhesivo DEVCON**



**b) Ejecución y resultados de la prueba**

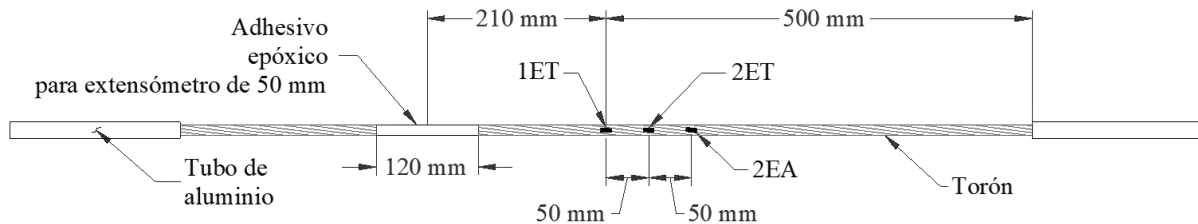
**Figura B.4 Procedimiento para la colocación del adhesivo DEVCON**



**Figura B.5** Curva carga-desplazamiento obtenida con el adhesivo DEVCON

La prueba con el adhesivo DEVCON se realizó satisfactoriamente, pero a causa de que el *strain gage* de 60 mm dejó de medir a una fuerza de tensión baja, se decidió no considerarlo en la instrumentación posterior de los torones. Sin embargo, durante las pruebas se detectó la necesidad de colocar adhesivo epóxico sobre el torón en una longitud suficiente para colocar el extensómetro de 50 mm de la máquina universal, de tal forma de garantizar una sujeción correcta entre éste y el torón. En otras palabras, se mantuvo la colocación del adhesivo epóxico pero con otro propósito.

Finalmente, para los primeros 15 torones correspondientes a la primera etapa, la instrumentación se llevó a cabo siguiendo la configuración que se ilustra en la figura B.6.



**Figura B.6** Configuración final de instrumentación con *strain gages*

donde

2EA *strain gage* YEFLA-2-5LT orientado de acuerdo al eje del alambre

2ET *strain gage* YEFLA-2-5LT orientado de acuerdo al eje del torón

1ET *strain gage* FLA-1-11-5LT orientado de acuerdo al eje del torón

El procedimiento que se siguió en la preparación e instrumentación de los torones se muestra en la figura B.7.



**a) Colocación de adhesivo para extensómetro**



**b) Instrumentación**

**Figura B.7 Preparación e instrumentación de torones**



## APÉNDICE C: CURVAS ESFUERZO-DEFORMACIÓN UNITARIA DEL ACERO DE PRESFUERZO

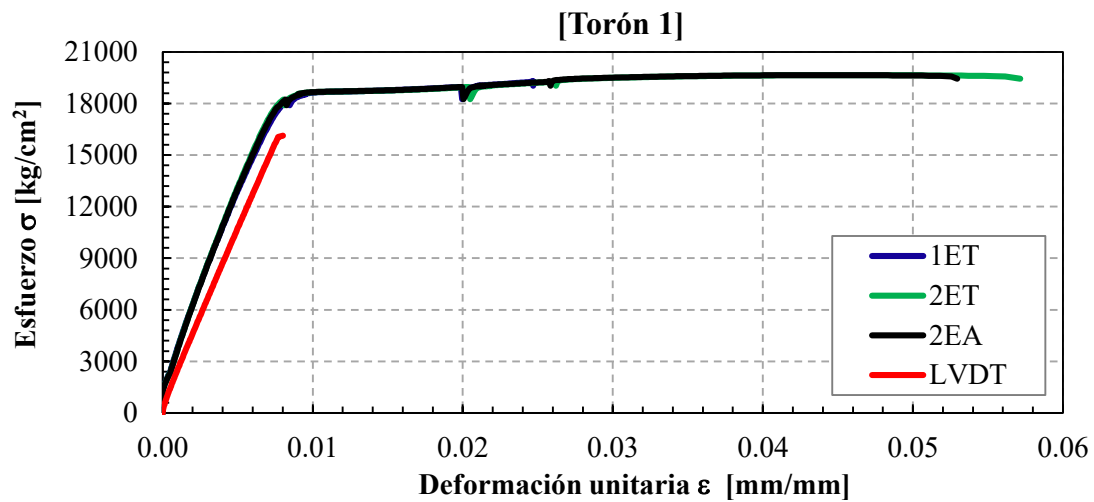


Figura C.1 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 1

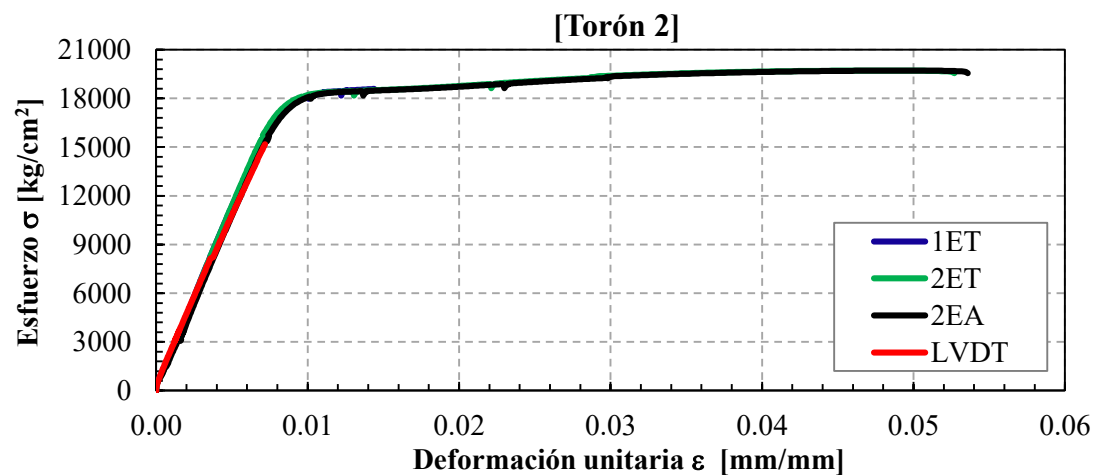


Figura C.2 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 2

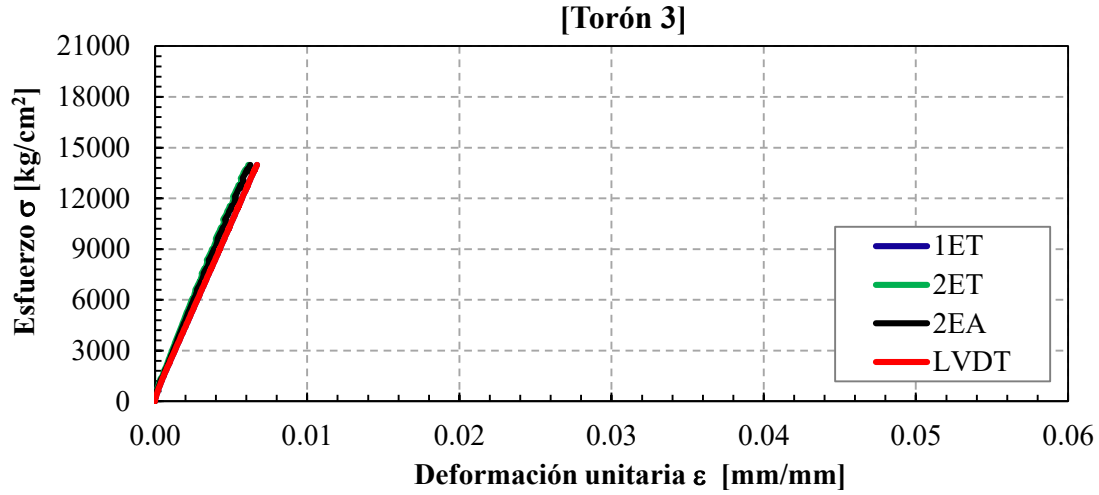


Figura C.3 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 3

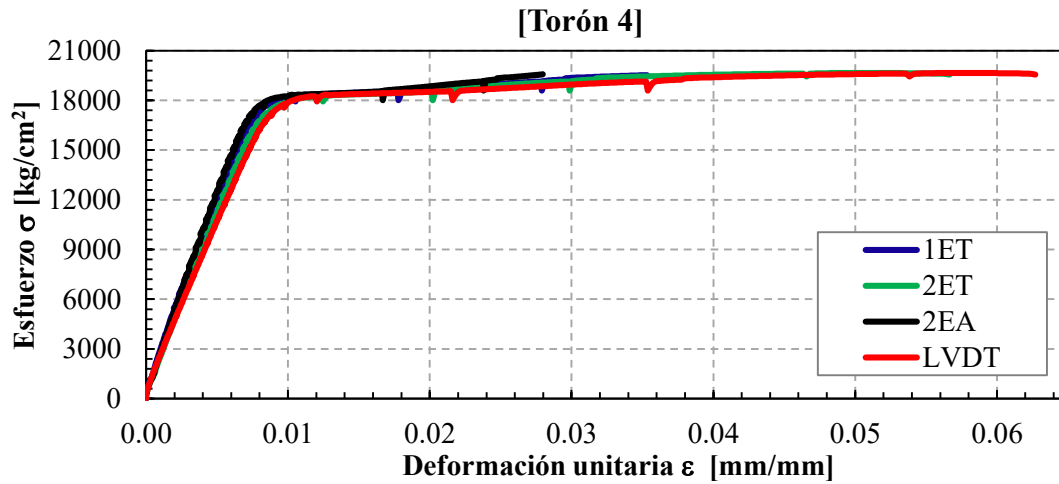


Figura C.4 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 4

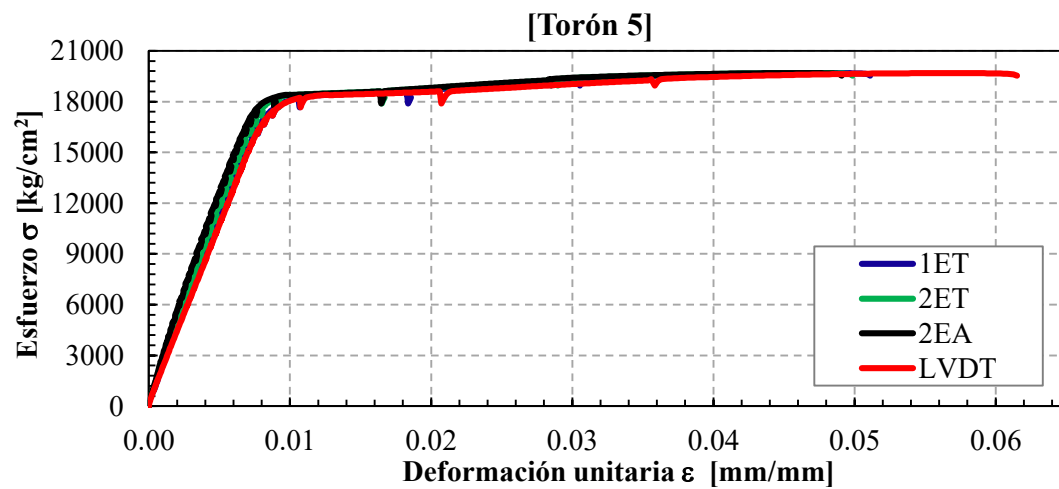


Figura C.5 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 5

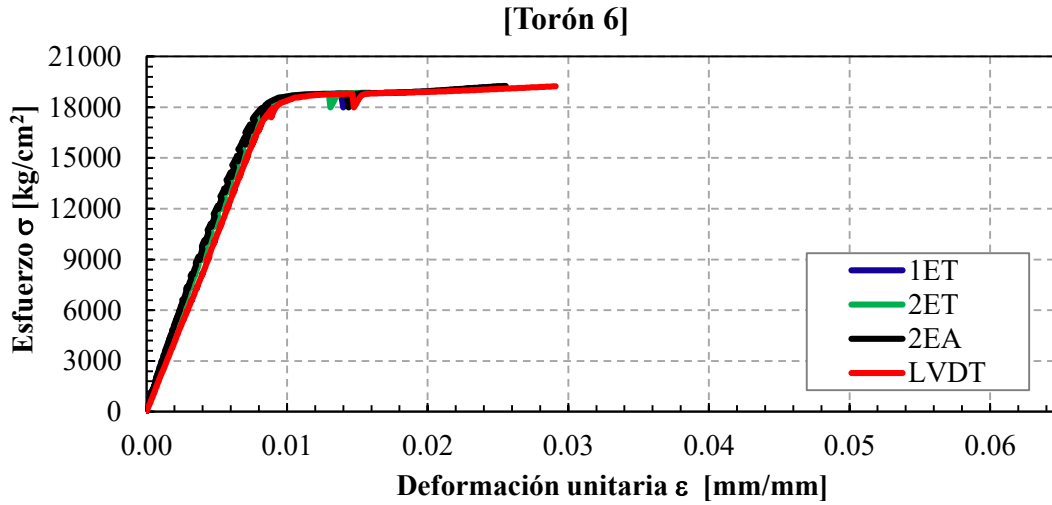


Figura C.6 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 6

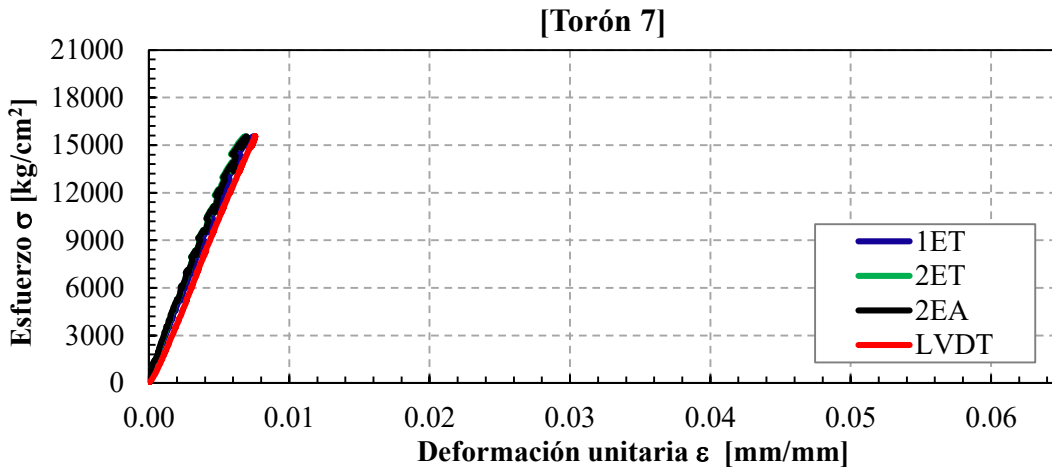


Figura C.7 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 7

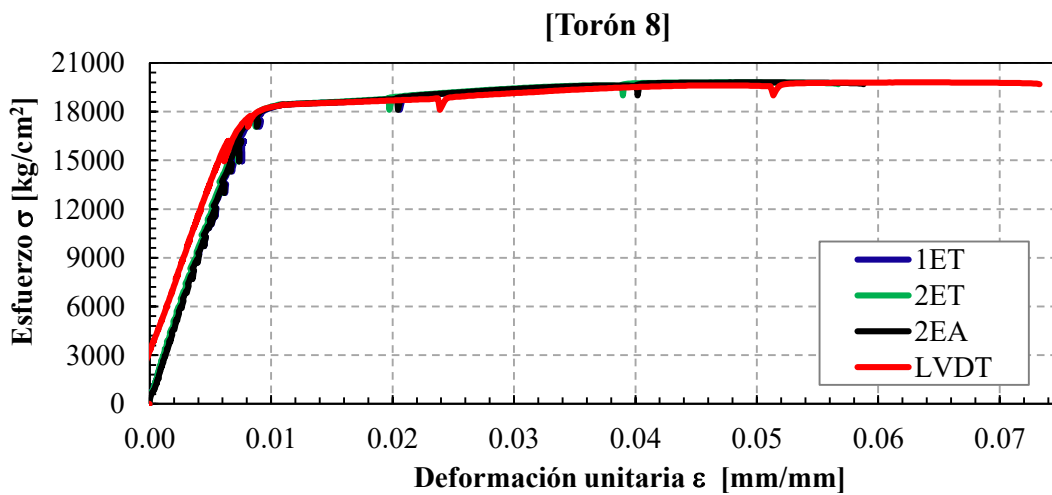


Figura C.8 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 8

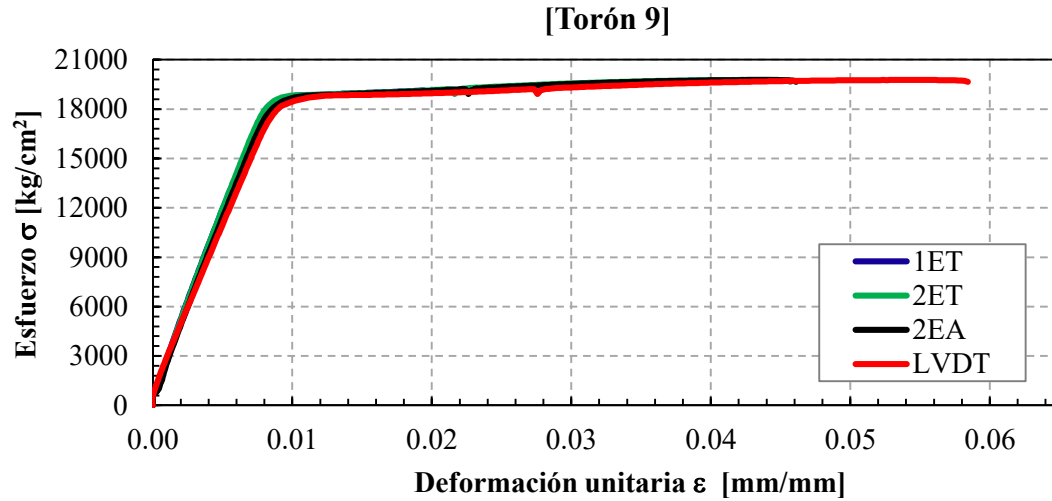


Figura C.9 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 9

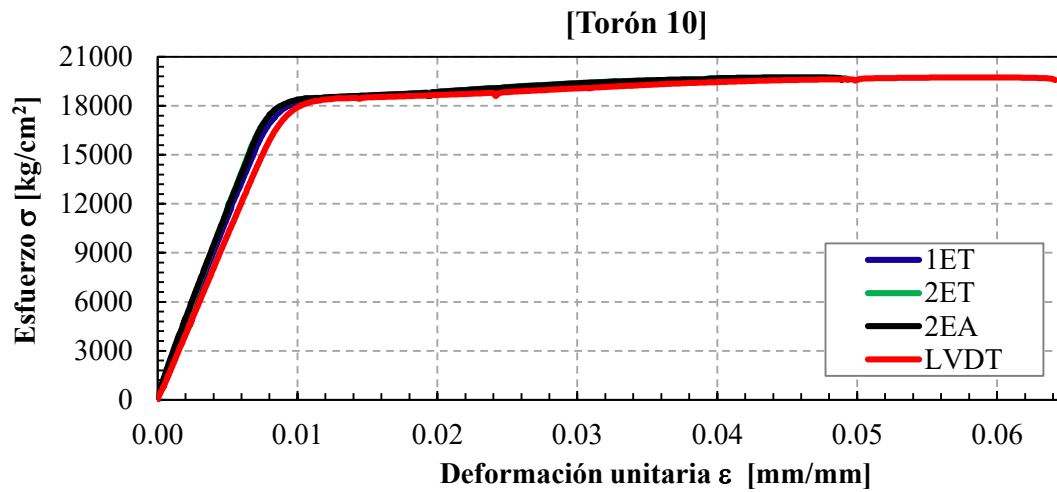


Figura C.10 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 10

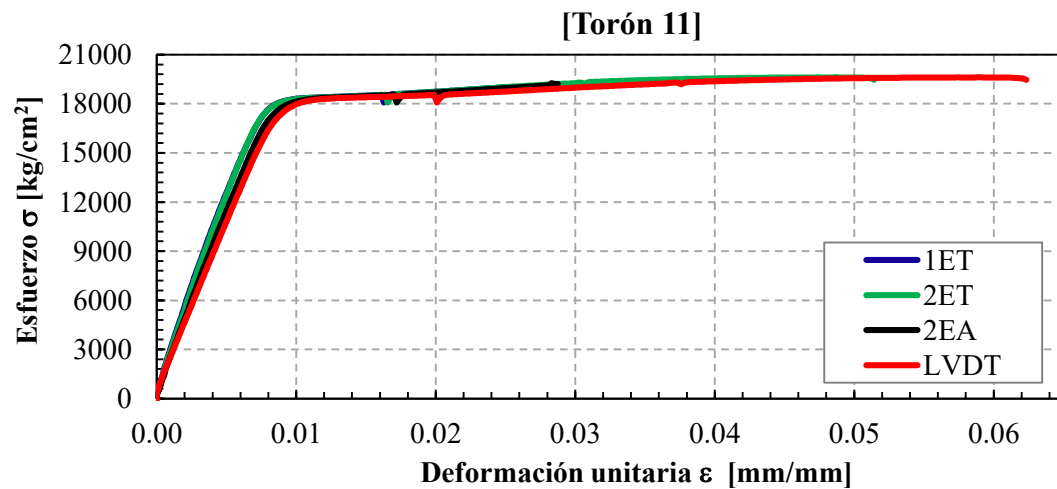


Figura C.11 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 11

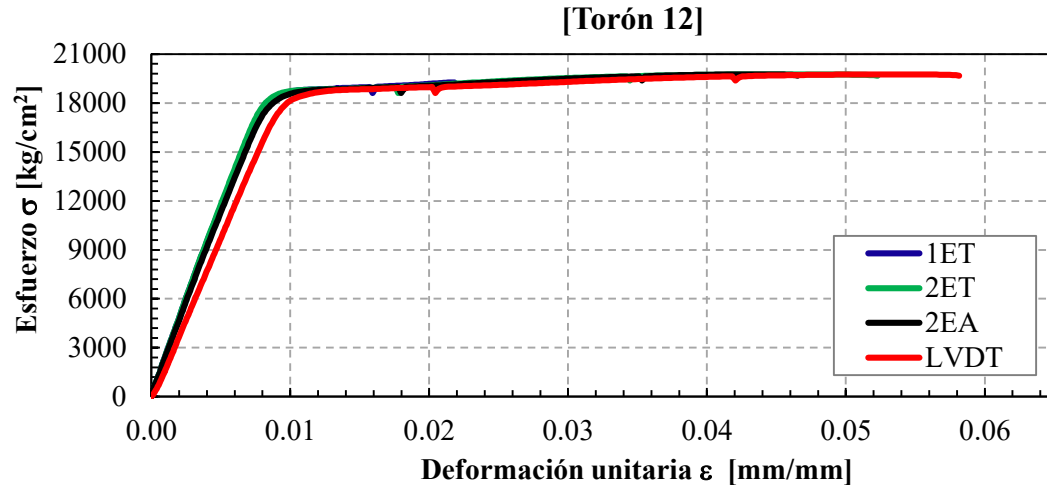


Figura C.12 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 12

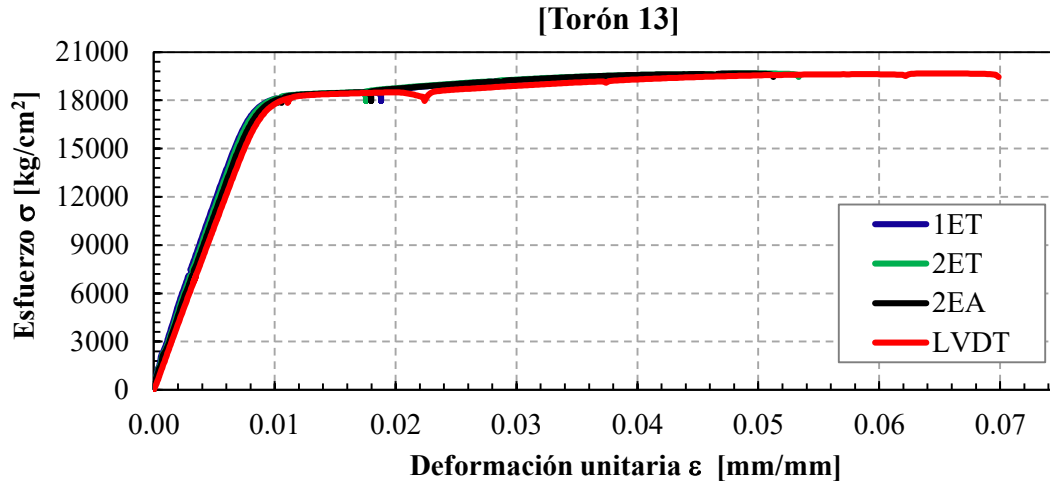


Figura C.13 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 13

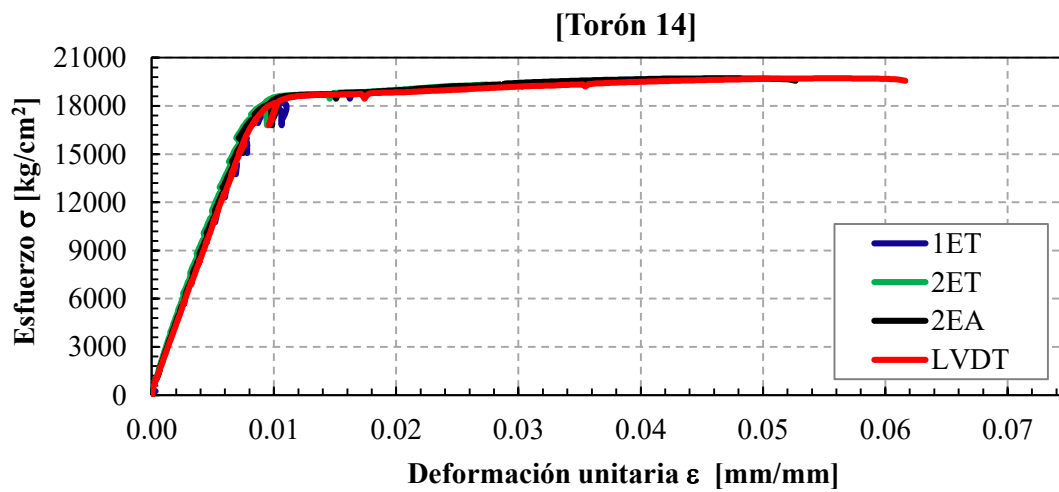


Figura C.14 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 14

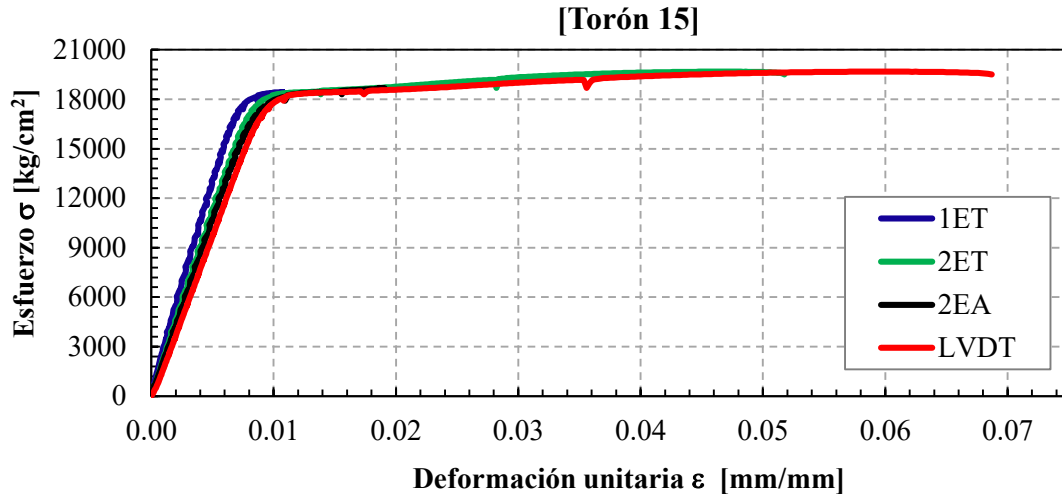


Figura C.15 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 15

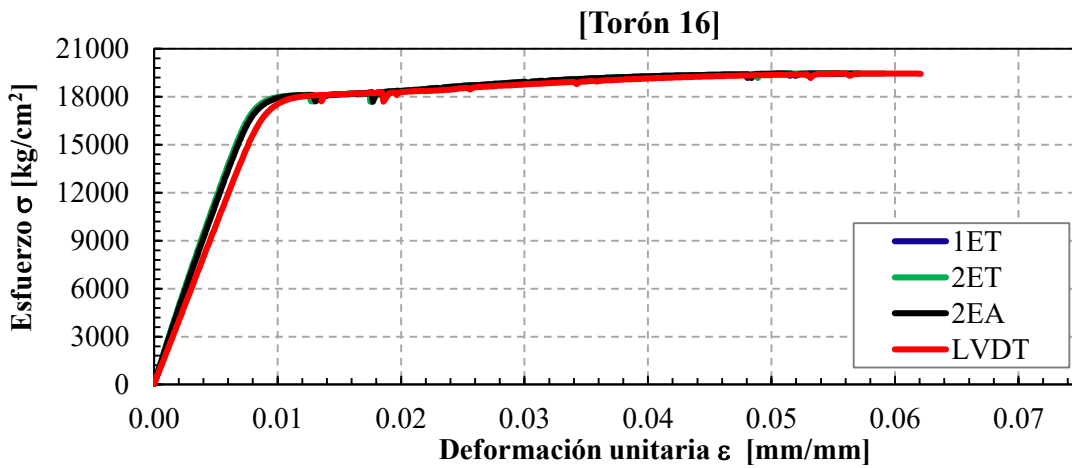


Figura C.16 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 16

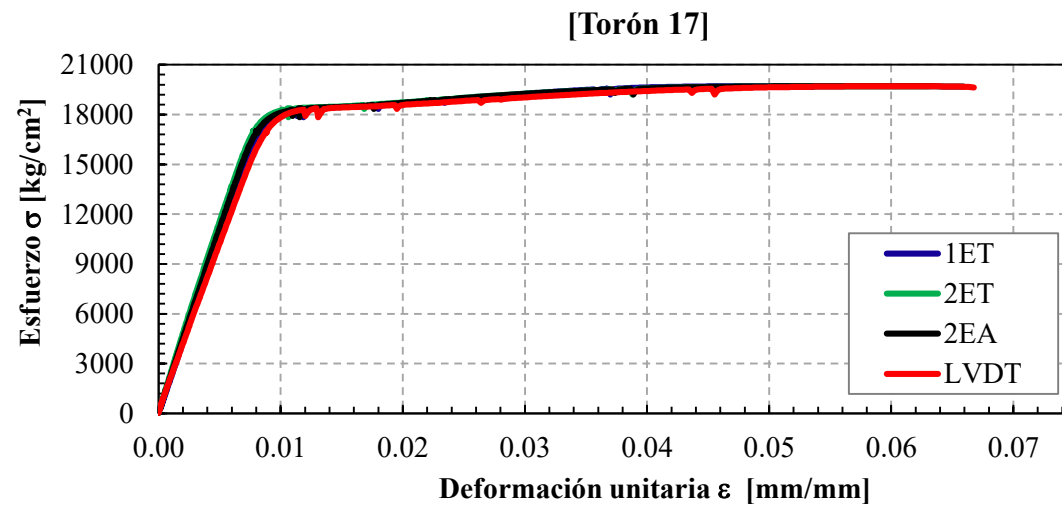


Figura C.17 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 17

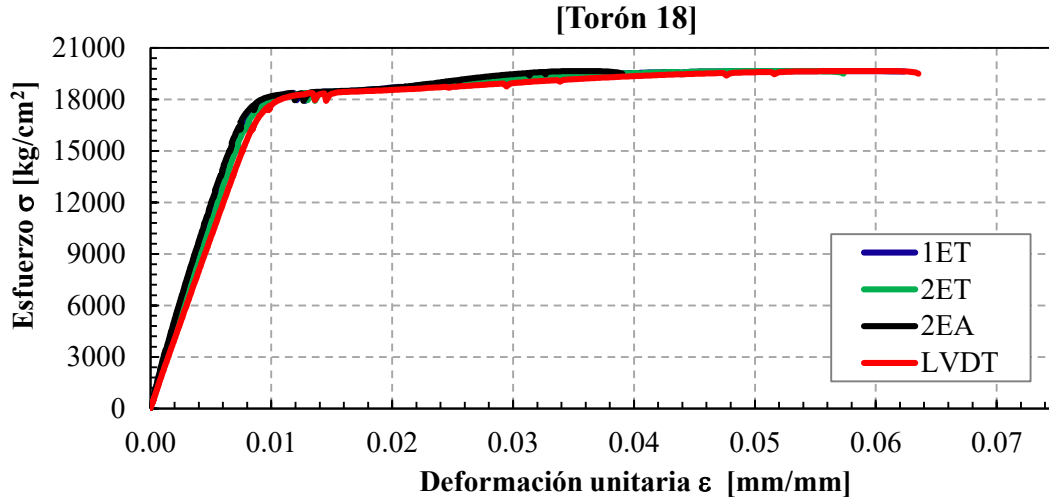


Figura C.18 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 18

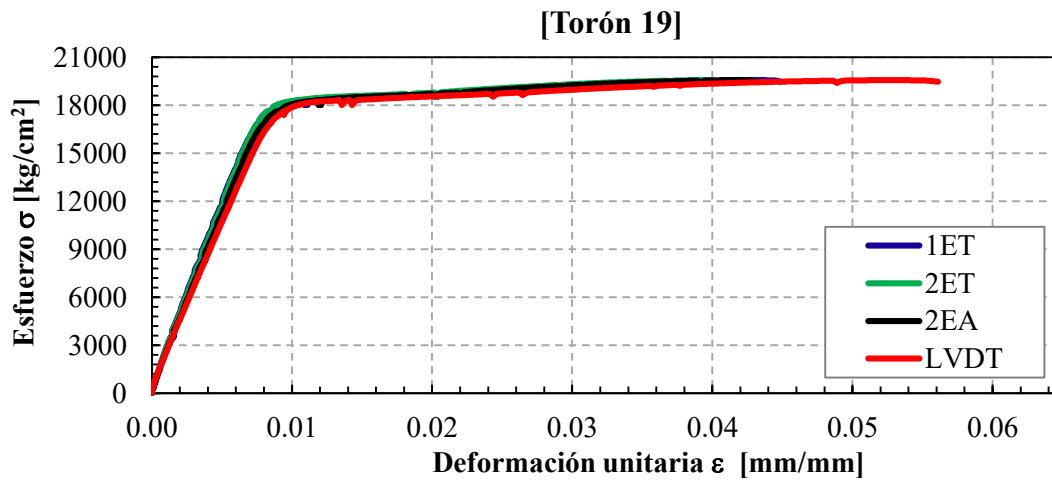


Figura C.19 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 19

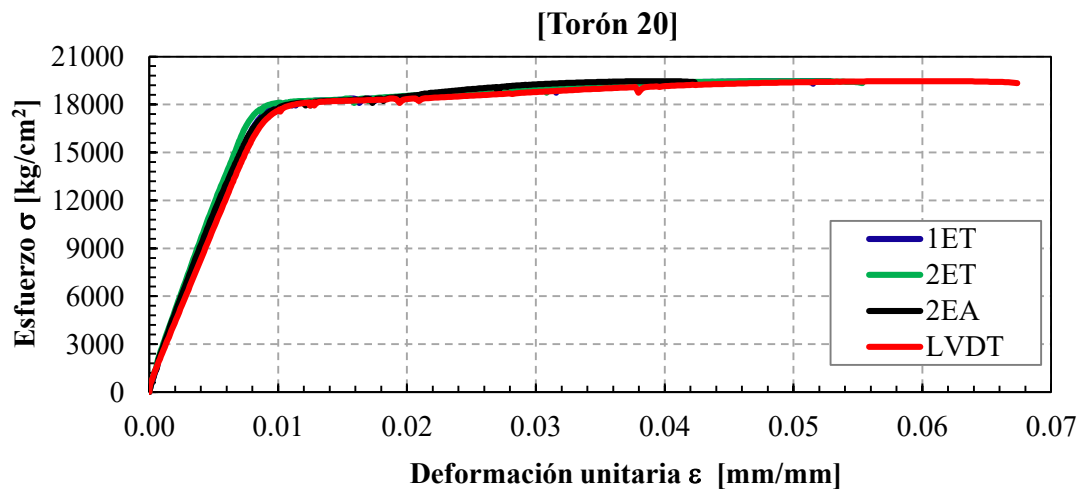


Figura C.20 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 20

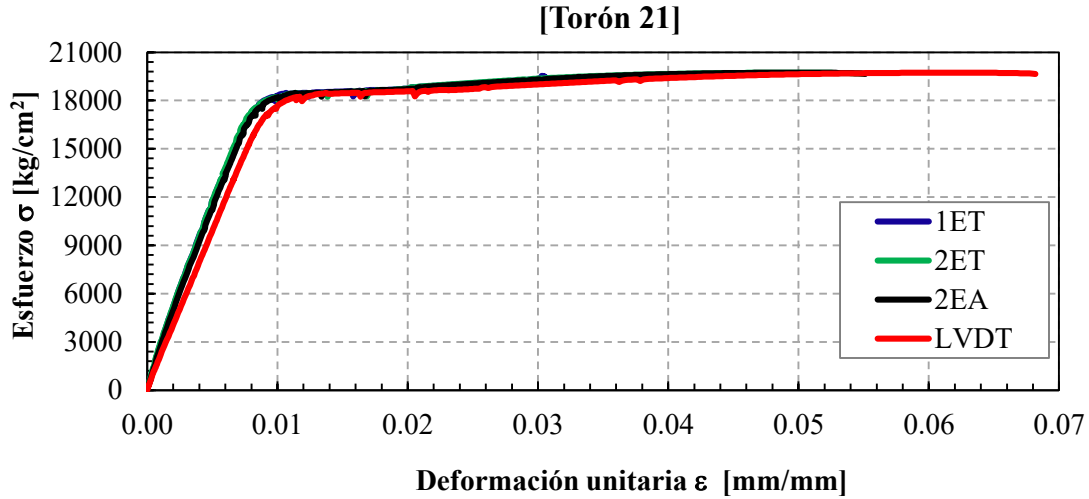


Figura C.21 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 21

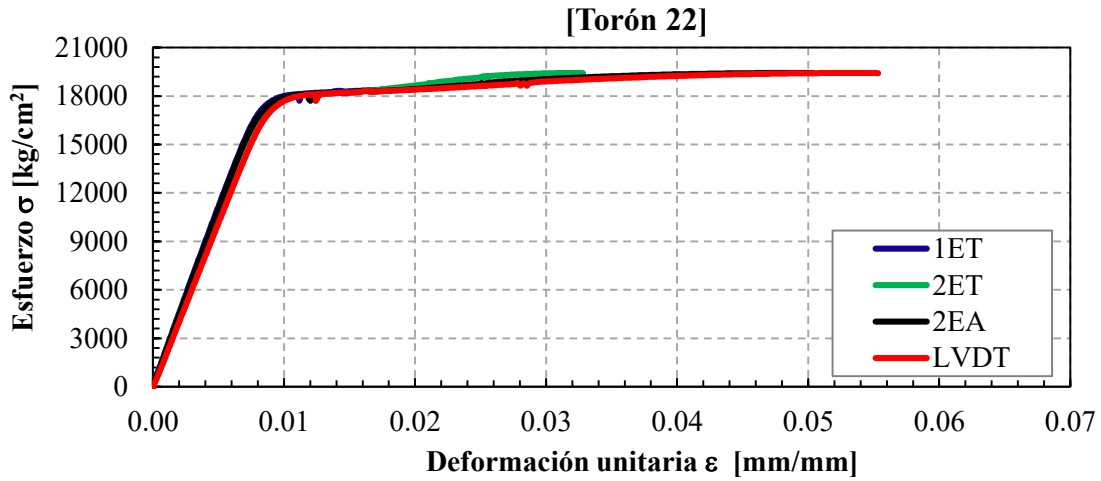


Figura C.22 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 22

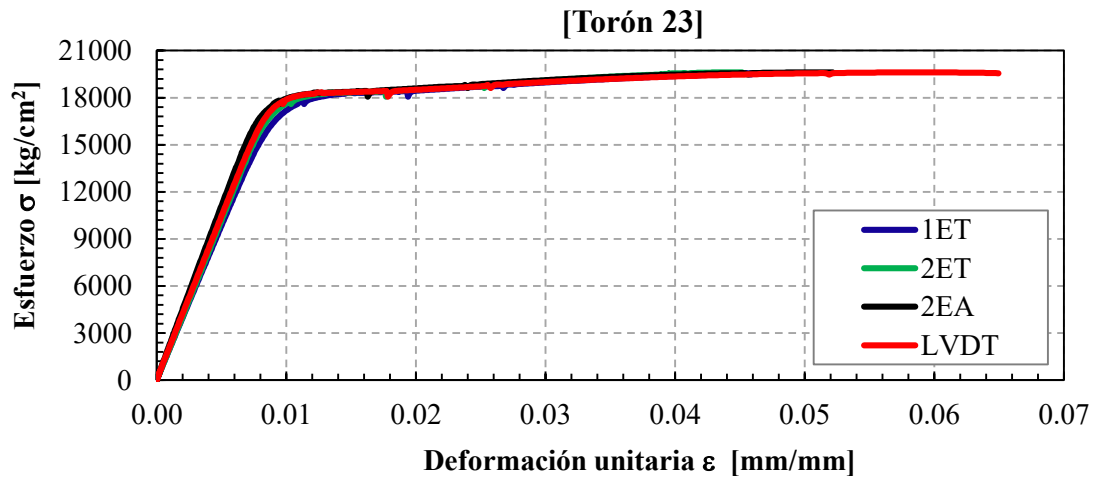


Figura C.23 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 23



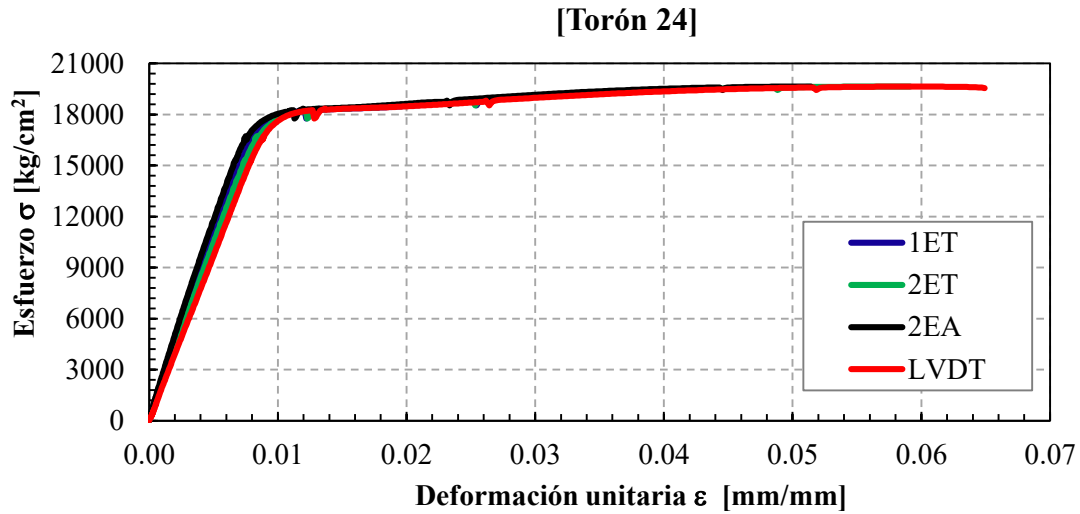


Figura C.24 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 24

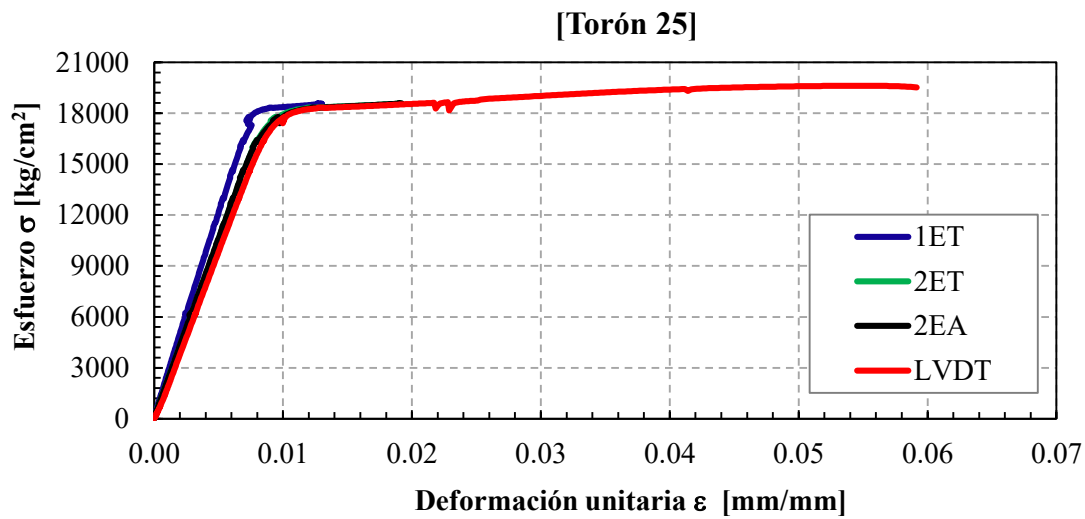


Figura C.25 Curvas esfuerzo-deformación del Torón 25

## APÉNDICE D: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO DE PRESFUERZO

### D.1 RESISTENCIAS DE RUPTURA

Tabla D.1 Resistencias de ruptura

		2EA		1ET		2ET		LVDT		
A	B	C	C'	D	D'	E	E'	F	F'	G
Esp	$f_{pu}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	$f_{rp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{rp}/f_{pu}$	Tipo de falla
Torón 1	19000	19443	1.02	19443	1.02	19443	1.02	-	-	RCE
Torón 2	19000	19554	1.03	19554	1.03	19554	1.03	-	-	RZM
Torón 3	19000	-	-	-	-	-	-	-	-	NRE
Torón 4	19000	19554	1.03	19554	1.03	19554	1.03	19554	1.03	RZM
Torón 5	19000	19541	1.03	19541	1.03	19541	1.03	19541	1.03	RZM
Torón 6	19000	-	-	-	-	-	-	-	-	NRE
Torón 7	19000	-	-	-	-	-	-	-	-	NRE
Torón 8	19000	19694	1.04	19694	1.04	19694	1.04	-	-	RCE
Torón 9	19000	19462	1.02	19462	1.02	19462	1.02	19462	1.02	RZM
Torón 10	19000	19581	1.03	19581	1.03	19581	1.03	19581	1.03	RCE
Torón 11	19000	19458	1.02	19458	1.02	19458	1.02	19458	1.02	RZM
Torón 12	19000	19669	1.04	19669	1.04	19669	1.04	19669	1.04	RZM
Torón 13	19000	19456	1.02	19456	1.02	19456	1.02	19456	1.02	RCE
Torón 14	19000	19555	1.03	19555	1.03	19555	1.03	19555	1.03	RCE
Torón 15	19000	19509	1.03	19509	1.03	19509	1.03	19509	1.03	RZM
Torón 16	19000	19374	1.02	19374	1.02	19374	1.02	19374	1.02	RZM
Torón 17	19000	19630	1.03	19630	1.03	19630	1.03	19630	1.03	RCE
Torón 18	19000	19497	1.03	19497	1.03	19497	1.03	19497	1.03	RCE
Torón 19	19000	19345	1.02	19345	1.02	19345	1.02	19345	1.02	RZM
Torón 20	19000	19296	1.02	19296	1.02	19296	1.02	19296	1.02	RCE
Torón 21	19000	19473	1.02	19473	1.02	19473	1.02	19473	1.02	RCE
Torón 22	19000	19408	1.02	19408	1.02	19408	1.02	19408	1.02	RAM
Torón 23	19000	19504	1.03	19504	1.03	19504	1.03	19504	1.03	RZM
Torón 24	19000	19550	1.03	19550	1.03	19550	1.03	19550	1.03	RAM
Torón 25	19000	19316	1.02	19316	1.02	19316	1.02	19316	1.02	RZM
<b>Promedio:</b>		<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19494</b>	<b>1.03</b>	<b>19483</b>	<b>1.03</b>	
<b>Desv. Estándar:</b>		<b>105.76</b>		<b>105.76</b>		<b>105.76</b>		<b>101.80</b>		
<b>C.V. [%]:</b>		<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.52</b>		

De los resultados presentados en la tabla D.1, para el caso de las resistencias se tiene que:

Columna A muestra el número de espécimen de prueba

Columna B	muestra la resistencia mínima requerida, $f_{pu}$
Columnas C, D, E y F	muestran la resistencia de ruptura de cada espécimen de prueba, $f_{rp}$ , para 2EA, 1ET, 2ET y LVDT, respectivamente.
Columnas C', D', E' y F'	muestran la relación $f_{rp}/f_{pu}$ de cada espécimen de prueba para 2EA, 1ET, 2ET y LVDT, respectivamente.

## D.2 RESISTENCIAS ÚLTIMAS

**Tabla D.2 Resistencias últimas**

A	B	2EA		1ET		2ET		LVDT	
		C	C'	D	D'	E	E'	F	F'
Esp	$f_{pu}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{up}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{up}/f_p$ u	$f_{up}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{up}/f_p$ u	$f_{up}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{up}/f_p$ u	$f_{up}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{up}/f_p$ u
Torón 2	19000	19714	1.04	19714	1.04	19714	1.04	-	-
Torón 3	19000	-	-	-	-	-	-	-	-
Torón 4	19000	19646	1.03	19646	1.03	19646	1.03	19646	1.03
Torón 5	19000	19686	1.04	19686	1.04	19686	1.04	19686	1.04
Torón 6	19000	-	-	-	-	-	-	-	-
Torón 7	19000	-	-	-	-	-	-	-	-
Torón 8	19000	19800	1.04	19800	1.04	19800	1.04	-	-
Torón 9	19000	19462	1.02	19462	1.02	19462	1.02	19462	1.02
Torón 10	19000	19744	1.04	19744	1.04	19744	1.04	19744	1.04
Torón 11	19000	19612	1.03	19612	1.03	19612	1.03	19612	1.03
Torón 12	19000	19757	1.04	19757	1.04	19757	1.04	19757	1.04
Torón 13	19000	19679	1.04	19679	1.04	19679	1.04	19679	1.04
Torón 14	19000	19719	1.04	19719	1.04	19719	1.04	19719	1.04
Torón 15	19000	19675	1.04	19675	1.04	19675	1.04	19675	1.04
Torón 16	19000	19466	1.02	19466	1.02	19466	1.02	19466	1.02
Torón 17	19000	19710	1.04	19710	1.04	19710	1.04	19710	1.04
Torón 18	19000	19660	1.03	19660	1.03	19660	1.03	19660	1.03
Torón 19	19000	19566	1.03	19566	1.03	19566	1.03	19566	1.03
Torón 20	19000	19465	1.02	19465	1.02	19465	1.02	19465	1.02
Torón 21	19000	19731	1.04	19731	1.04	19731	1.04	19731	1.04
Torón 22	19000	19436	1.02	19436	1.02	19436	1.02	19436	1.02
Torón 23	19000	19610	1.03	19610	1.03	19610	1.03	19610	1.03
Torón 24	19000	19639	1.03	19639	1.03	19639	1.03	19639	1.03
Torón 25	19000	19613	1.03	19613	1.03	19613	1.03	19613	1.03
<b>Promedio:</b>		<b>19638</b>	<b>1.03</b>	<b>19638</b>	<b>1.03</b>	<b>19638</b>	<b>1.03</b>	<b>19625</b>	<b>1.03</b>
<b>Desv. Estándar:</b>		<b>105.31</b>		<b>105.31</b>		<b>105.31</b>		<b>101.78</b>	
<b>C.V. [%]:</b>		<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.54</b>		<b>0.52</b>	

### D.3 RESISTENCIAS DE FLUENCIA

Tabla D.3 Resistencias de fluencia (parte A)

A	B	2EA			1ET		
		C	C'	C''	D	D'	D''
Esp	$f_{py}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_y$ [mm/mm]	$f_{pyy}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyy}/f_p$ y	$\epsilon_y$ [mm/mm]	$f_{pyy}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyy}/f_p$ y
Torón 1	17100	0.0101	18661	1.09	0.0103	18647	1.09
Torón 2	17100	0.0104	18187	1.06	0.0103	18185	1.06
Torón 3	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 4	17100	0.0096	18223	1.07	0.0101	18218	1.07
Torón 5	17100	0.0097	18389	1.08	0.0107	18226	1.07
Torón 6	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 7	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 8	17100	0.0102	18311	1.07	0.0106	18359	1.07
Torón 9	17100	0.0104	18443	1.08	0.0104	18511	1.08
Torón 10	17100	0.0103	18406	1.08	0.0106	18385	1.08
Torón 11	17100	0.0104	18216	1.07	0.0099	18293	1.07
Torón 12	17100	0.0105	18670	1.09	0.0104	18755	1.10
Torón 13	17100	0.0106	18120	1.06	0.0104	18120	1.06
Torón 14	17100	0.0109	18603	1.09	0.0113	18536	1.08
Torón 15	17100	0.0107	18118	1.06	0.0095	18358	1.07
Torón 16	17100	0.0102	17960	1.05	0.0102	17964	1.05
Torón 17	17100	0.0103	18178	1.06	0.0104	18109	1.06
Torón 18	17100	0.0101	18212	1.07	0.0101	18192	1.06
Torón 19	17100	0.0103	18129	1.06	0.0100	18223	1.07
Torón 20	17100	0.0109	18014	1.05	0.0110	18127	1.06
Torón 21	17100	0.0106	18302	1.07	0.0105	18419	1.08
Torón 22	17100	0.0103	17966	1.05	0.0103	18047	1.06
Torón 23	17100	0.0102	18010	1.05	0.0112	17786	1.04
Torón 24	17100	0.0100	18045	1.06	0.0106	18049	1.06
Torón 25	17100	0.0107	18051	1.06	0.0098	18348	1.07
<b>Promedio:</b>		<b>0.0103</b>	<b>18237</b>	<b>1.07</b>	<b>0.0104</b>	<b>18266</b>	<b>1.07</b>
<b>Desv. Estándar:</b>		<b>0.0003</b>	<b>215.52</b>		<b>0.0004</b>	<b>226.66</b>	
<b>C.V. [%]:</b>		<b>3.10</b>	<b>1.18</b>		<b>4.07</b>	<b>1.24</b>	

**Tabla D.4 Resistencias de fluencia (parte B)**

A	B	2ET			LVDT		
		E	E'	E''	F	F'	F''
Esp	$f_{py}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_y$ [mm/mm]	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$	$\epsilon_y$ [mm/mm]	$f_{pyp}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$f_{pyp}/f_{py}$
Torón 1	17100	0.0101	18657	1.09	-	-	-
Torón 2	17100	0.0101	18242	1.07	-	-	-
Torón 3	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 4	17100	0.0104	18053	1.06	0.0112	18180	1.06
Torón 5	17100	0.0100	18387	1.08	0.0107	18218	1.07
Torón 6	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 7	17100	-	-	-	-	-	-
Torón 8	17100	0.0102	18336	1.07	-	-	-
Torón 9	17100	0.0101	18517	1.08	0.0112	18364	1.07
Torón 10	17100	0.0101	18392	1.08	0.0111	18261	1.07
Torón 11	17100	0.0098	18270	1.07	0.0110	18204	1.06
Torón 12	17100	0.0102	18749	1.10	0.0112	18416	1.08
Torón 13	17100	0.0104	18120	1.06	0.0110	18094	1.06
Torón 14	17100	0.0107	18629	1.09	0.0109	18457	1.08
Torón 15	17100	0.0103	18304	1.07	0.0111	18197	1.06
Torón 16	17100	0.0101	17991	1.05	0.0111	17889	1.05
Torón 17	17100	0.0101	18264	1.07	0.0111	18193	1.06
Torón 18	17100	0.0105	18083	1.06	0.0112	18123	1.06
Torón 19	17100	0.0100	18259	1.07	0.0109	18117	1.06
Torón 20	17100	0.0104	18134	1.06	0.0113	17997	1.05
Torón 21	17100	0.0104	18260	1.07	0.0114	18206	1.06
Torón 22	17100	0.0104	17933	1.05	0.0109	17944	1.05
Torón 23	17100	0.0108	17914	1.05	0.0108	18100	1.06
Torón 24	17100	0.0108	17989	1.05	0.0113	18084	1.06
Torón 25	17100	0.0107	18146	1.06	0.0111	18097	1.06
<b>Promedio:</b>		<b>0.0103</b>	<b>18256</b>	<b>1.07</b>	<b>0.0111</b>	<b>18165</b>	<b>1.06</b>
<b>Desv. Estándar:</b>		<b>0.0003</b>	<b>232.60</b>		<b>0.0002</b>	<b>145.85</b>	
<b>C.V. [%]:</b>		<b>2.63</b>	<b>1.27</b>		<b>1.65</b>	<b>0.80</b>	

De las tablas D.3 y D.4 se tiene que:

Columna A	muestra el número de espécimen de prueba
Columna B	muestra la resistencia de fluencia mínima requerida, $f_{py}$ , (0.9x19000kg/cm <sup>2</sup> )
Columnas C, D, E y F	muestran la deformación de fluencia de cada espécimen de prueba, $\epsilon_y$ , para 2EA, 1ET, 2ET y LVDT, respectivamente

Columnas C', D', E' y F' muestran la resistencia de fluencia de cada espécimen de prueba,  $f_{py}$ , para 2EA, 1ET, 2ET y LVDT, respectivamente

Columnas C'', D'', E'' y F'' muestran la relación  $f_{py}/f_{py}$  de cada espécimen de prueba para 2EA, 1ET, 2ET y LVDT, respectivamente.

#### **D.4 MÓDULOS DE ELASTICIDAD**

**Tabla D.5 Módulos de elasticidad**

	2EA	1ET	2ET	LVDT
A	B	C	D	E
Esp	E [kg/cm <sup>2</sup> ]			
Torón 1	2,301,614	2,252,355	2,311,404	-
Torón 2	2,158,530	2,187,485	2,244,605	-
Torón 3	-	-	-	-
Torón 4	2,384,335	2,242,730	2,137,329	1,980,183
Torón 5	2,389,112	2,106,876	2,285,096	2,097,772
Torón 6	-	-	-	-
Torón 7	-	-	-	-
Torón 8	2,220,144	2,130,214	2,241,244	-
Torón 9	2,187,041	2,211,821	2,280,340	2,006,341
Torón 10	2,228,918	2,144,777	2,265,743	2,008,770
Torón 11	2,163,442	2,325,595	2,335,912	2,028,574
Torón 12	2,185,501	2,237,727	2,290,486	2,005,783
Torón 13	2,096,151	2,165,106	2,155,184	2,007,322
Torón 14	2,094,665	2,001,921	2,150,799	2,066,123
Torón 15	2,082,039	2,442,883	2,205,733	2,000,622
Torón 16	2,180,983	2,200,323	2,231,564	1,967,921
Torón 17	2,186,832	2,165,326	2,242,694	1,988,736
Torón 18	2,238,665	2,233,555	2,128,271	1,963,410
Torón 19	2,184,238	2,291,331	2,272,238	2,027,702
Torón 20	2,030,086	2,015,501	2,161,341	1,944,521
Torón 21	2,136,691	2,170,908	2,186,028	1,939,101
Torón 22	2,170,853	2,178,714	2,145,843	2,025,045
Torón 23	2,193,540	1,938,391	2,029,857	2,061,081
Torón 24	2,242,111	2,106,766	2,049,122	1,936,436
Torón 25	2,079,266	2,358,063	2,074,908	1,999,300
<b>Promedio:</b>	<b>2,187,943</b>	<b>2,186,744</b>	<b>2,201,170</b>	<b>2,002,881</b>
<b>Desv. Estándar:</b>	<b>89,905</b>	<b>115,955</b>	<b>85,720</b>	<b>43,228</b>
<b>C.V. [%]:</b>	<b>4.11</b>	<b>5.30</b>	<b>3.89</b>	<b>2.16</b>

## D.5 ELONGACIONES

**Tabla D.6 Elongaciones**

Esp	2EA	1ET	2ET	LVDT
	Elongación [%]			
Torón 1	5.30	2.51	5.72	-
Torón 2	5.36	1.44	5.27	-
Torón 3	-	-	-	-
Torón 4	2.83	3.53	5.67	6.27
Torón 5	4.91	5.11	4.99	6.15
Torón 6	-	-	-	-
Torón 7	-	-	-	-
Torón 8	5.88	2.79	5.67	-
Torón 9	4.61	1.94	4.57	5.84
Torón 10	4.89	3.28	4.93	6.41
Torón 11	2.86	2.55	5.14	6.23
Torón 12	4.65	2.18	5.23	5.82
Torón 13	5.12	3.30	5.33	6.99
Torón 14	5.27	3.95	2.78	6.16
Torón 15	1.90	1.07	5.18	6.87
Torón 16	5.71	5.63	5.91	6.41
Torón 17	5.83	5.36	5.82	6.68
Torón 18	3.91	5.89	5.73	6.35
Torón 19	4.32	4.49	4.06	5.63
Torón 20	4.25	5.24	5.54	6.76
Torón 21	5.51	3.02	5.49	6.82
Torón 22	5.04	2.16	3.28	5.53
Torón 23	5.22	4.58	4.52	6.52
Torón 24	5.13	3.44	5.89	6.49
Torón 25	2.78	1.35	2.25	5.96
<b>Promedio:</b>	<b>4.60</b>	<b>3.40</b>	<b>4.95</b>	<b>6.31</b>
<b>Desv. Estándar:</b>	<b>1.10</b>	<b>1.46</b>	<b>1.02</b>	<b>0.42</b>
<b>C.V. [%]:</b>	<b>23.93</b>	<b>42.97</b>	<b>20.56</b>	<b>6.64</b>

## APÉNDICE E: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO Y EL ACERO DE REFUERZO

En este apéndice se presentan los resultados de diversas pruebas que se realizaron para obtener las propiedades mecánicas del concreto y el acero de refuerzo utilizados en la construcción de los modelos de ensaye. Los procedimientos se llevaron a cabo de acuerdo con los requisitos establecidos en las Normas Mexicanas NMX vigentes.

### E.1 CONCRETO

#### E.1.1 Resistencia a la compresión

Las pruebas se realizaron en diferentes etapas para tener conocimiento de los incrementos de resistencia a compresión del concreto,  $f'_c$ . Parte de los especímenes sirvieron como cilindros de control para realizar las pruebas de módulo de elasticidad. Como se observa en la tabla E.1, a partir del primer espécimen probado ya se había cumplido con la resistencia de diseño ( $f'_c=350 \text{ kg/cm}^2$ ), y en las últimas dos pruebas se tuvieron resistencias superiores a  $500 \text{ kg/cm}^2$ . Las pruebas se realizaron en distintas etapas.

**Tabla E.1 Resultados de resistencia a la compresión del concreto**

No. 1	Especimen	Fecha de colado	Fecha de prueba	Edad [días]	$f'_c$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	ESP-01-P1	23-sep-16	16-oct-16	23	417
2	ESP-02-P1		16-oct-16	23	417
3	ESP-02-P1		16-oct-16	23	431
4	ESP-01-P2		09-dic-16	77	478
5	ESP-02-P2		13-dic-16	81	506
6	ESP-01-P3		15-dic-16	83	497
7	ESP-02-P3		15-dic-16	83	480
8	ESP-01-P4		28-feb-17	158	511
9	ESP-02-P4		28-feb-17	158	507





**a) Antes de la prueba**



**b) Después de la prueba**

**Figura E.1 Prueba de resistencia a la compresión**

### **E.1.2 Módulo de elasticidad**

Se determinó el módulo de elasticidad,  $E$ , como la pendiente de la secante definida a partir dos puntos de la curva esfuerzo–deformación de cada prueba. Las pruebas se realizaron en tres etapas. Los resultados se muestran en la tabla E.2.

**Tabla E.2 Módulos de elasticidad**

<b>No.</b>	<b>Espécimen</b>	<b>Fecha de colado</b>	<b>Fecha de prueba</b>	<b>E [kg/cm<sup>2</sup>]</b>
1	ESP-01	23-sep-16	16-dic-16	254,396
2	ESP-02			261,488
3	ESP-03			272,292
4	ESP-01		28-feb-17	233,860
5	ESP-02			255,156
6	ESP-03			250,421
7	ESP-04			246,711
8	ESP-05		01-mar-17	251,840
9	ESP-06			244,054
10	ESP-07			241,696



**Figura E.2 Prueba de módulo de elasticidad**

### **E.1.3 Resistencia a la flexión**

Se determinó el módulo de ruptura, MR, de vigas de concreto simplemente apoyadas aplicando carga al centro de su claro (figura E.3). Los resultados se presentan en la tabla E.3.

**Tabla E.3 Módulos de ruptura**

<b>No.</b>	<b>Espécimen</b>	<b>Fecha de colado</b>	<b>Fecha de prueba</b>	<b>MR [kg/cm<sup>2</sup>]</b>
1	ESP-01-P1	23-sep-16	09-dic-16	40
2	ESP-02-P1		13-dic-16	42
3	ESP-03-P1		14-dic-16	44
4	ESP-04-P1		14-dic-16	51
5	ESP-05-P1		15-dic-16	50
6	ESP-06-P1		16-dic-16	47
7	ESP-07-P2	02-mar-17	02-mar-17	35
8	ESP-08-P2		02-mar-17	38
9	ESP-09-P2		02-mar-17	35
10	ESP-10-P2		02-mar-17	37
11	ESP-11-P2		02-mar-17	36



**Figura E.3 Prueba de resistencia a la flexión**

#### **E.1.4 Resistencia a la tensión**

Se determinó la resistencia a la tensión,  $T$ , por compresión diametral de cinco cilindros de concreto. Los resultados se presentan en la tabla E.4.

**Tabla E.4 Resistencias a la tensión**

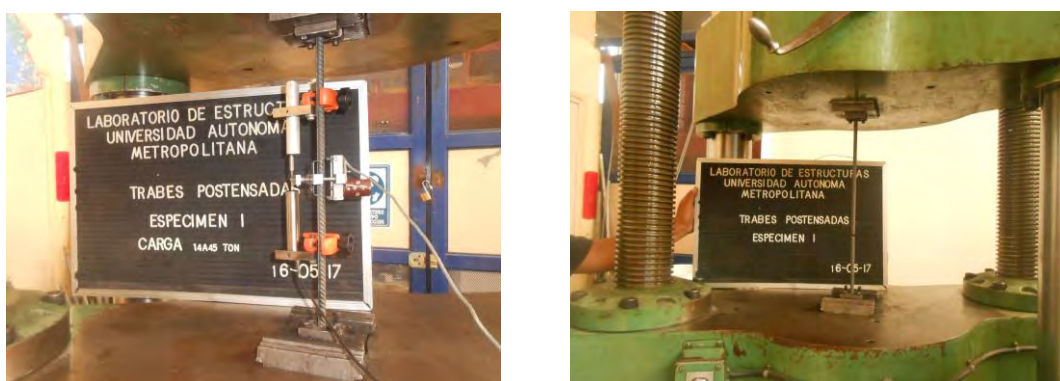
No.	Espécimen	Fecha de prueba	Edad [días]	$T$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	ESP-01-P1	23-sep-16	09-dic-16	24
2	ESP-02-P1		13-dic-16	37
3	ESP-03-P1		16-dic-16	42
4	ESP-01-P2	02-mar-17	02-mar-17	41
5	ESP-02-P2		02-mar-17	39



**Figura E.4 Prueba de resistencia a la tensión**

## E.2 ACERO DE REFUERZO

Se realizaron pruebas de tensión de barras de refuerzo del mismo lote con el que se construyeron los modelos de ensaye. Fueron seis barras del No.5 (15.875 mm de diámetro) y cinco del No.3 (9.525 mm de diámetro) de 80 cm de longitud. Los especímenes fueron instrumentados con un LVDT y un extensómetro considerando una longitud calibrada de 20 cm como se muestra en la figura E.5.



**Figura E.5 Prueba de resistencia a la tensión de acero de refuerzo**

De acuerdo con la norma NMX-C-407-ONNCCE, para ambos diámetros se debe cumplir:

- Resistencia mínima a la tensión: 6300 kg/cm<sup>2</sup>
- Esfuerzo de fluencia mínimo: 4200 kg/cm<sup>2</sup>
- Alargamiento mínimo en 200 mm: 9%

Se aplicó el criterio de Chauvenet a los resultados de la barra del No.5 sin detectar datos anómalos. En todos los resultados se cumplió con las mínimas magnitudes admisibles (tabla E.5).

**Tabla E.5 Resultados de la barra del No. 5**

Esp.	Diámetro [mm]	E <sub>s</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	f <sub>y</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	ε <sub>y</sub> [mm/mm]	ε <sub>sh</sub> [mm/mm]	f <sub>su</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	ε <sub>su</sub> [mm/mm]	Elong %
1	15.88	1,966,252	4481	0.00265	0.00938	7241	0.1463	14%
2	15.88	2,148,542	4601	0.00241	0.01147	7324	0.1573	15%
3	15.88	2,110,269	4649	0.00231	0.01106	7256	0.1535	17%
4	15.88	1,854,720	4490	0.00286	0.00988	7276	0.1405	13%
5	15.88	2,033,538	4614	0.00267	0.01073	7317	0.1610	14%
6	15.88	1,948,760	4718	0.00277	0.01201	7320	0.1584	18%
<b>Promedio:</b>		2,010,347	4592	0.00261	0.01075	7289	0.1528	15%

La curva esfuerzo-deformación típica del acero de refuerzo de acuerdo a Rodríguez y Botero (1997) se presenta en la figura E.6.

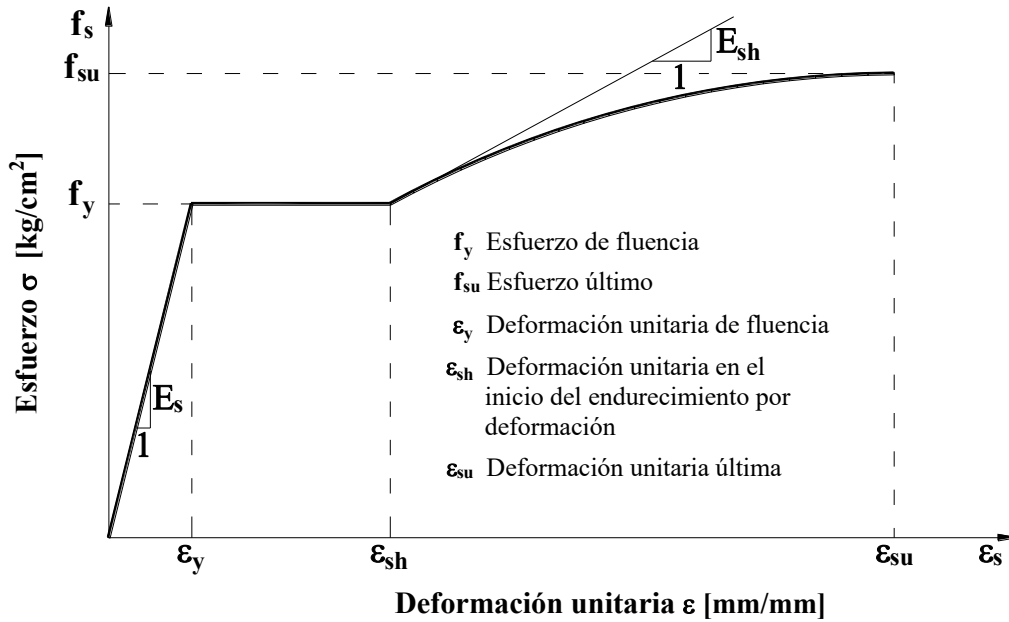


Figura E.6 Curva esfuerzo-deformación típica de barras de acero (adaptada de Rodríguez y Botero 1997)

De los resultados de la barra del No. 5 se obtuvo la curva promedio que se ilustra en la figura E.7.

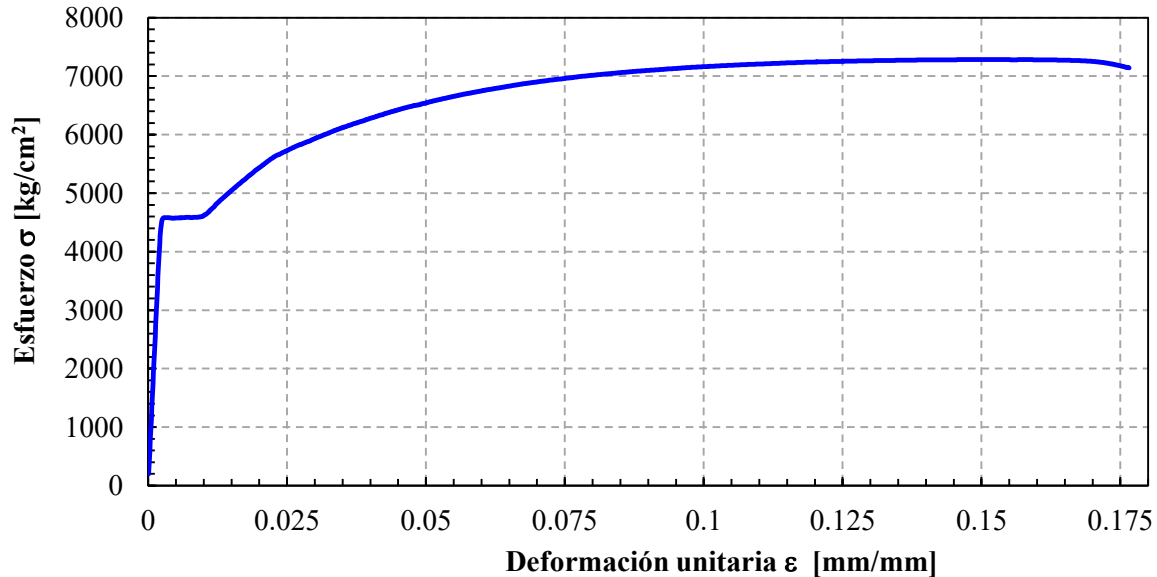


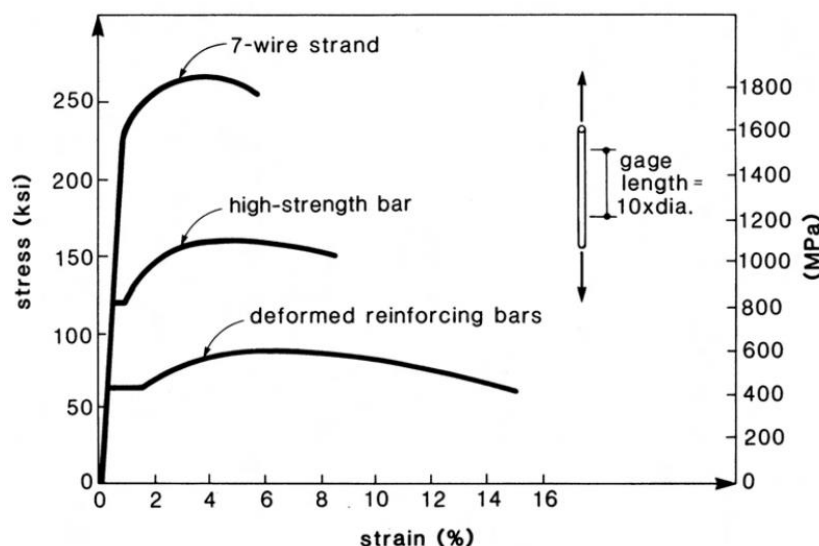
Figura E.7 Curva esfuerzo-deformación promedio de la barra del No. 5

En el caso de la barra del No. 3 sólo se presentan los datos correspondientes al esfuerzo último, deformación unitaria última y la elongación, ya que los demás resultados presentaron inconsistencias.

**Tabla E.6 Resultados de la barra del No. 3**

$f_{su}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{su}$ [mm/mm]	Elong %
7645	0.12646	14.75%
7805	0.13065	15.70%
7786	0.12938	14.30%
7637	0.13780	15.90%
7774	0.13345	11.60%

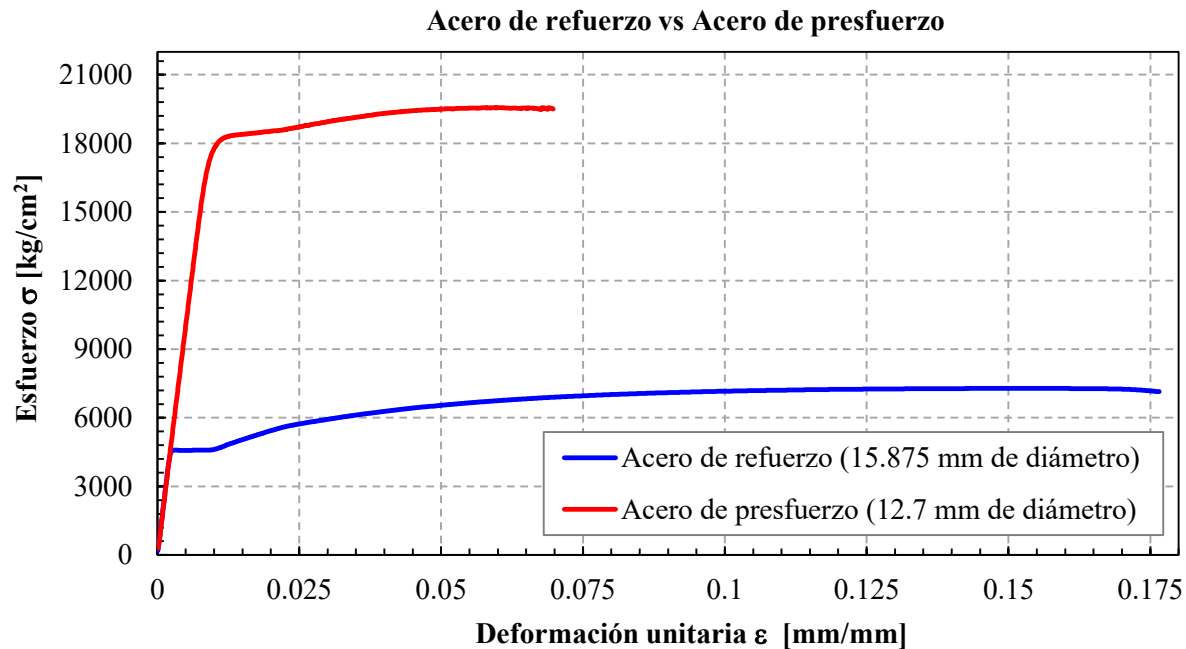
En la figura E.8, se representan curvas esfuerzo-deformación típicas del acero de presfuerzo y el acero de refuerzo (Collins y Mitchell 1991). Como se puede apreciar, en el presfuerzo el punto de fluencia no está bien definido, caso contrario al acero de refuerzo en dónde se define con mayor claridad. Además, en cuanto a las deformaciones unitarias el acero de refuerzo alcanza magnitudes mayores.



**Figura E.8 Curvas esfuerzo-deformación (tomada de Collins y Mitchell 1991)**

En la figura E.9 se comparan las curvas esfuerzo-deformación promedio obtenidas en este trabajo para el acero de presfuerzo (12.7 mm de diámetro) de acuerdo al capítulo 4 y la barra del No.5 (15.875 mm de diámetro), en donde se aprecia una tendencia similar a la figura E.8.





**Figura E.9 Comparación de curvas esfuerzo-deformación**

### E.3 REFERENCIAS

1. Collins, M P y D Mitchell (1991), Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
2. NMX-C-159-ONNCCE (2016), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción - Concreto. “Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto”, NMX-C-159-ONNCCE-2016.
3. NMX-C-083-ONNCCE (2014), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción – Concreto. “Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes - Método de Ensayo”, NMX-C-083-ONNCCE-2014.
4. NMX-C-407-ONNCCE (2001), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción. “Varilla Corrugada de Acero Proveniente de Lingote y Palanquilla para Refuerzo de Concreto - Especificaciones y Métodos de Prueba”, NMX-C-407-ONNCCE-2001.
5. NMX-C-128-ONNCCE (2013), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción - Concreto

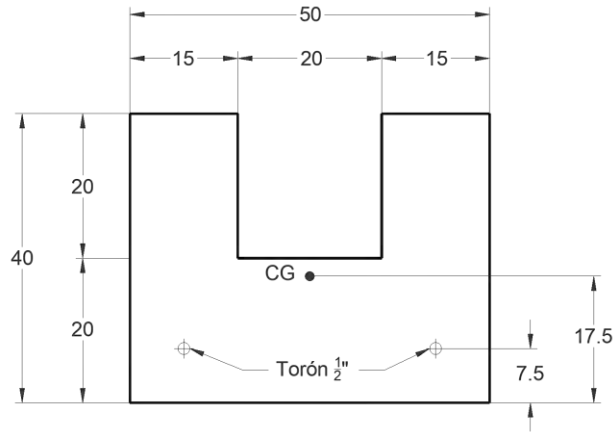
Sometido A Compresión “Determinación del Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson”, NMX-C-128-ONNCCE-2013.

6. NMX-C-163-ONNCCE (1997), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción – Concreto. “Determinación de la Resistencia a la Tensión por Compresión Diametral de Cilindros de Concreto”, NMX-C-163-ONNCCE-1997.
7. NMX-C-303-ONNCCE (2010), Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), Industria de la Construcción - Concreto Hidráulico, “Determinación de la Resistencia a la Flexión Usando una Viga Simple con Carga en el Centro del Claro”, NMX-C-303-ONNCCE-2010.
8. Rodríguez, M E y J C Botero (1997), “Evaluación del comportamiento de barras de acero de refuerzo sometidas a cargas monotónicas y cíclicas reversibles incluyendo pandeo”, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 56, pp. 9-27.



## APÉNDICE F: CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE PRESFUERZO

Se realizó el cálculo de pérdidas de presfuerzo de acuerdo con los criterios establecidos en el manual ANNIPAC (2000), considerando las pérdidas aplicables a elementos postensados. El cálculo se hizo para la sección donde se tienen los torones inferiores permanentes (figura F.1). Los porcentajes de pérdidas que se calcularon se ingresaron al programa Concise Beam para el diseño de los modelos de ensaye.



**Figura F.1 Sección transversal**

### F.1 DATOS

$$y = 17.5 \text{ cm} \quad I_{ss} = 203,333.33 \text{ cm}^4 \quad A_{ss} = 1600 \text{ cm}^2 \quad f'_c = 350 \text{ cm}^2 \quad L = 420 \text{ cm} \quad \gamma_c = 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Se tienen 2 torones de presfuerzo de 1.27 cm de diámetro formados por 7 alambres:

$$N_{\text{torones}} = 2 \quad r = 7.5 \text{ cm} \quad A_{\text{efect}} = 0.99 \text{ cm}^2 \quad e = y - r = 10 \text{ cm}$$

$$\phi_{\text{torón}} = 1.27 \text{ cm} \quad A_p = 0.99 \text{ cm}^2 * N_{\text{torones}} = 1.98 \text{ cm}^2$$

$$\text{Esfuerzo de ruptura: } f_{pu} = f_{sr} = 19000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Módulo de elasticidad del presfuerzo: } E_p = 1,960,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Esfuerzo de tensado: } f_{pi} = 0.80 f_{sr} = 15200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

## **F.2 SOLUCIÓN**

Cálculo de constantes:

$$f^*c = f'ci = 0.8 f'c = 280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad f''c = 0.85 f^*c = 238 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad f_{py} = 0.9 f_{sr} = 17100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$E_{cpi} = 14000 \sqrt{350 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 261,916.02 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad E_{ci} = 14000 \sqrt{280 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 234,264.81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Cálculo de cargas (sólo peso propio):

$$W_{pp} = A_{ss} * \gamma_c = 3.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}} \quad (\text{Considerando sólo el peso propio de la sección hueca})$$

### **F.2.1 PÉRDIDAS INMEDIATAS**

No se considera pérdida por fricción porque los torones son rectos.

#### **F.2.1.1 Pérdida por deslizamiento de anclaje**

$\delta l = 0.50 \text{ cm}$  (De acuerdo al manual ANNIPAC debe ser de 1 - 10 mm)

$$\Delta_{DA} = \frac{\delta l * E_p}{L} = 2333.33 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

#### **F.2.1.2 Pérdida por acortamiento elástico**

$$\Delta_{AE} = \left( \frac{E_p}{E_{ci}} \right) * f_{cgp} \quad \text{Siendo: } P_{pj} = A_{p'} * f_{pi} = 30096 \text{ kg}$$

El esfuerzo se debe calcular en el centro de gravedad del presfuerzo.

$$f_{cgp} = \frac{P_{pj}}{A_{ss}} + \frac{P_{pj} * e}{I_{ss}} * y_{cgp} - \frac{M_{pp}}{I_{ss}} * y_{cgp}$$

Donde  $M_{pp}$  es el momento máximo, que se da al centro del claro debido al peso propio del elemento.

$$M_{pp} = \frac{W_{pp} * L^2}{8} = \frac{\left(3.84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}}\right)(420 \text{ cm})^2}{8} = 84672 \text{ kg} * \text{cm}$$

Siendo:  $y_{cgp} = e$

$$f_{cgp} = \frac{(30096 \text{ kg})}{1600 \text{ cm}^2} + \frac{30096 \text{ kg} * 10 \text{ cm}}{203,333.33 \text{ cm}^4} * 10 \text{ cm} - \frac{84672 \text{ kg} * \text{cm}}{203,333.33 \text{ cm}^4} * 10 \text{ cm} = 29.45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Nota: el módulo de elasticidad del concreto a utilizar es el que se obtiene empleando el  $f'_{ci}$ , es decir, el 80% del  $f'_c$

$$\Delta_{AE} = \left( \frac{1,960,000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{234,264.81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \right) * 29.45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 246.40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Esfuerzo efectivo después de las pérdidas iniciales

$$f_e = f_{pi} - \Delta_{DA} - \Delta_{AE} = 12620.27 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

## **F.2.2 PÉRDIDAS DIFERIDAS**

### **F.2.2.1 Pérdida por contracción del concreto**

$$\Delta_{CC} = 1193 - 10.5 * H$$

Considerando que se tiene una humedad relativa del 70%, de acuerdo a la tabla 2.4 del manual ANNIPAC (2000) se tiene que  $H=70$ , por lo tanto:

$$\Delta_{CC} = 1193 - 10.5 * 70 = 458 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### **F.2.2.2 Pérdidas por flujo plástico**

$$\Delta_{FP} = 12 * f_{cgp} - 7 * f_{cds}$$

donde:

$f_{\text{cds}}$ , es el estado de esfuerzos en el centro de gravedad del acero de presfuerzo cuando se aplican las cargas permanentes adicionales, que para este caso valen cero. Por lo tanto:  $M_{\text{cm}} = M_{\text{imp}} = 0$

$$y_{\text{cgp}} = e = 10 \text{ cm} , \quad f_{\text{cds}} = f_{\text{cgp}} - \frac{M_{\text{cm}}}{I_{\text{ss}}} * y_{\text{cgp}} - \frac{M_{\text{imp}}}{I_{\text{ss}}} * y_{\text{cgp}} = 29.45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\Delta_{\text{FP}} = 12 * f_{\text{cgp}} - 7 * f_{\text{cds}} = 12 * 29.45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 7 * 29.45 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 147.25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### F.2.2.3 Pérdida diferida en el acero de presfuerzo

Por ser acero de baja relajación, se considera el factor 1/4.

$$\Delta_{\text{REd}} = \frac{1}{4} [1408 - 0.3 * \Delta_{\text{FR}} - 0.4 * \Delta_{\text{AE}} - 0.2 (\Delta_{\text{CC}} + \Delta_{\text{FP}})]$$

$$\Delta_{\text{FR}} = 0 \quad \Delta_{\text{AE}} = 246.40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \Delta_{\text{CC}} = 458 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \Delta_{\text{FP}} = 147.25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\Delta_{\text{REd}} = \frac{1}{4} \left[ 1408 - 0.3 * 0 - 0.4 * 246.40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} - 0.2 \left( 458 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} + 147.25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \right] = 297.10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

**Tabla F.1 Resumen de pérdidas**

<b>a) Pérdidas inmediatas</b>		
Pérdida por deslizamiento de anclaje	$2333.33 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	15.35%
Pérdida por acortamiento elástico	$246.40 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	1.62%
<b>b) Pérdidas diferidas</b>		
Pérdida por contracción del concreto	$458 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	3.01%
Pérdidas por flujo plástico	$147.25 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	0.97%
Pérdida diferida en el acero de presfuerzo	$297.10 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	1.95%

Pérdida inicial:

$$\Delta_{ini} = \Delta_{DA} + \Delta_{AE} = 2579.73 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\Delta\%_{ini} = \frac{\Delta_{ini}}{f_{pi}} = \frac{2579.73 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{15200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 16.97 \%$$

$$\text{Esf. efectivo}_{inicial} = 12620 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Pérdida total:

$$\Delta_{PT} = \Delta_{DA} + \Delta_{AE} + \Delta_{CC} + \Delta_{FP} + \Delta_{REd} = 3482.08 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\Delta\%_{PT} = \frac{\Delta_{PT}}{f_{pi}} = \frac{3482.08 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{15200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 22.91 \%$$

$$\text{Esf. efectivo}_{total} = 11718 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

### F.3 REFERENCIAS

1. Concise Beam (2016), “Concise Beam User’s Manual versión 4.59x 2016”, Black Mint Software, Inc. 675 Cooper St., Ottawa ON, K1R 5J3, CANADÁ.
2. Reinoso, E, M Rodríguez y R Betancourt (2000), “Manual de Diseño de estructuras Prefabricadas y Presforzadas”, ANIPPAC. México.

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO

En este apéndice se presentan las deformaciones unitarias que se midieron en el acero de refuerzo durante la ejecución de las pruebas descritas en el capítulo 6. La nomenclatura utilizada es de acorde al mismo capítulo. La deformación unitaria de fluencia promedio que se obtuvo en las pruebas de tensión fue de 0.00261 mm/mm (apéndice E).

Los *strain gages* se colocaron como se ilustra en la figura G.1.

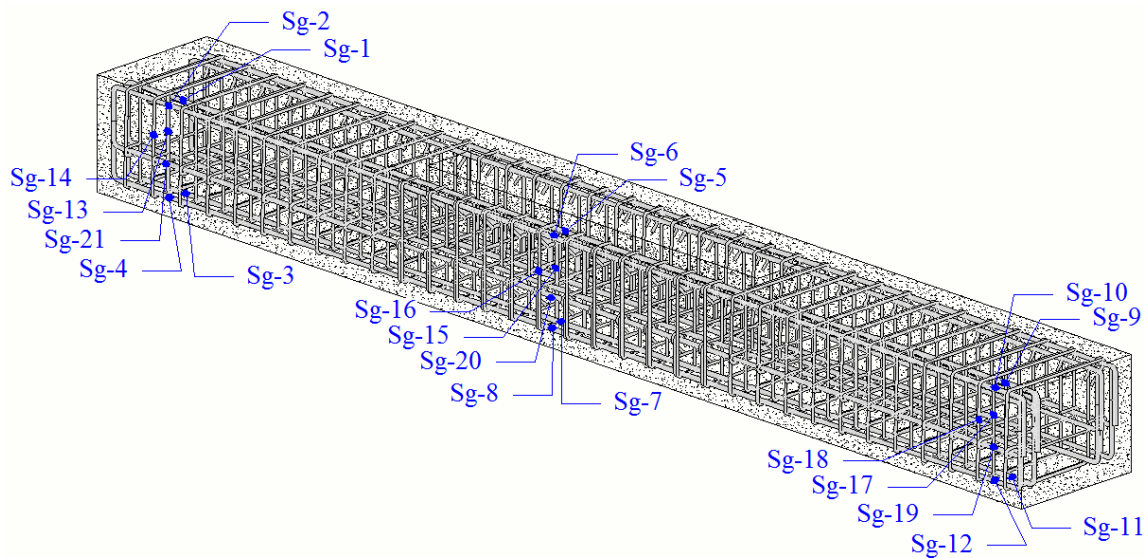


Figura G.1 Ubicación de *strain gages* en el acero de refuerzo

### G.1 MODELO DE ENSAYE TP-150

#### G.1.1 Torón 1 DC-TP-150-E1

Tabla G.1 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte A

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	-0.0040	-0.0041	0.0002	0.0004	-0.0065	-0.0076	0.0007	0.0008	-0.0042	-0.0040
$\approx 0.50f_{pu}$	9485	-0.0043	-0.0044	0.0008	0.0003	-0.0076	-0.0094	0.0014	0.0009	-0.0047	-0.0048
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	-0.0046	-0.0044	0.0011	0.0015	-0.0088	-0.0108	0.0018	0.0019	-0.0060	-0.0058
$\approx 0.70f_{pu}$	13284	-0.0057	-0.0058	0.0011	0.0014	-0.0106	-0.0128	0.0020	0.0019	-0.0072	-0.0070
$\approx 0.80f_{pu}$	15149	-0.0065	-0.0066	0.0015	0.0018	-0.0125	<b>-0.0149</b>	0.0023	<b>0.0024</b>	-0.0081	-0.0080

Tabla G.2 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte B

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	0.0005	0.0005	0.0002	-0.0001	0.0006	0.0004	0.0001	0.0004	-0.0008	-0.0017	-0.0008
$\approx 0.50f_{pu}$	9485	0.0008	0.0008	0.0002	0.0003	0.0008	0.0008	0.0005	0.0006	-0.0007	-0.0021	-0.0012
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	0.0011	0.0010	0.0006	0.0011	0.0011	0.0014	0.0006	0.0004	-0.0008	-0.0025	-0.0010
$\approx 0.70f_{pu}$	13284	0.0011	0.0011	0.0008	0.0014	0.0010	0.0011	0.0007	0.0006	-0.0011	-0.0030	-0.0013
$\approx 0.80f_{pu}$	15149	0.0013	0.0014	0.0009	0.0015	0.0011	0.0014	0.0007	0.0008	-0.0012	-0.0033	-0.0014

En las figuras G.2 y G.3 se muestran gráficamente las deformaciones unitarias (línea color azul) medidas durante la carga y descarga de los cinco ciclos considerados en las tablas G.1 y G.2. En color rojo se indica el límite de fluencia. Se observa que las magnitudes de las deformaciones unitarias medidas son muy bajas en comparación con la deformación unitaria de fluencia. Ocurrió lo mismo con el resto de las pruebas, de las cuales se presentan sus resultados en las siguientes secciones.

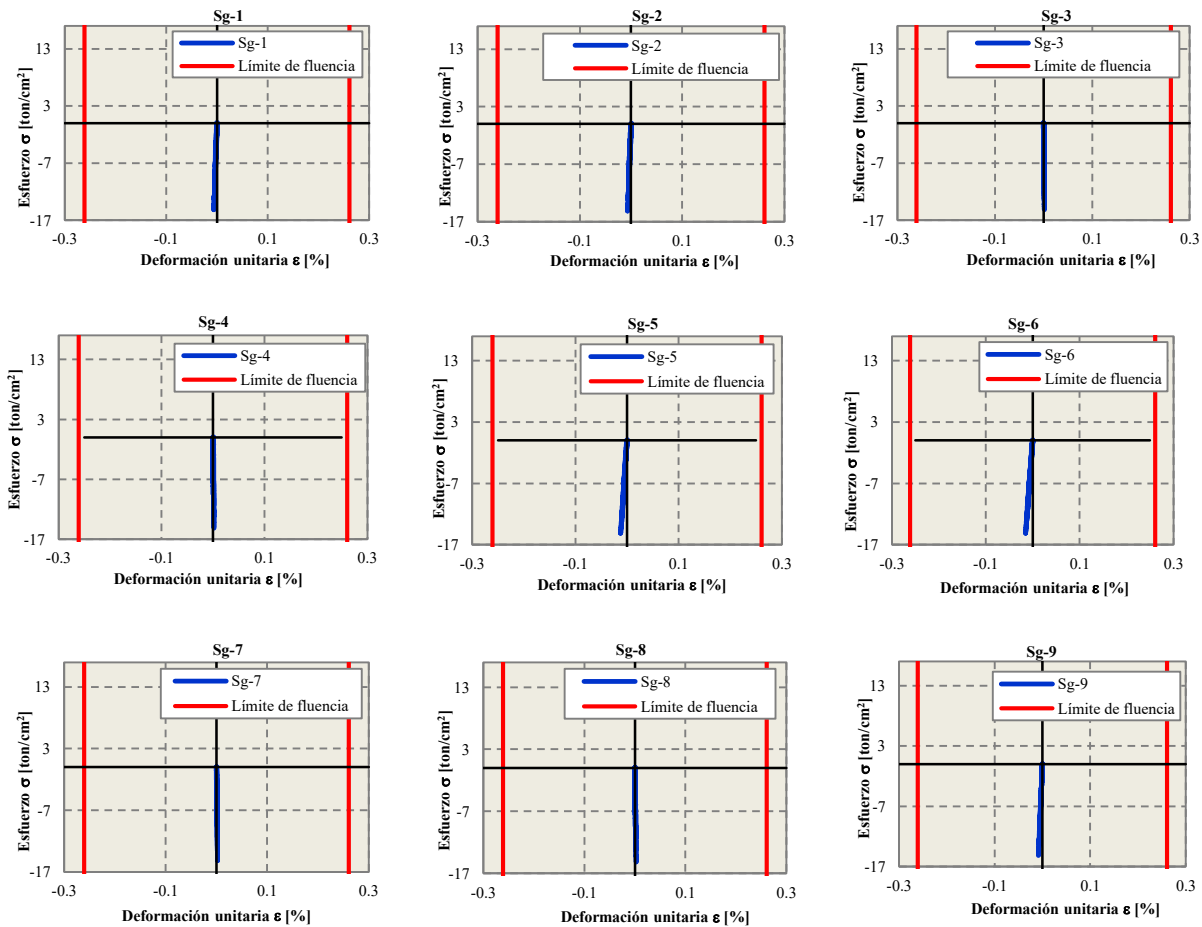
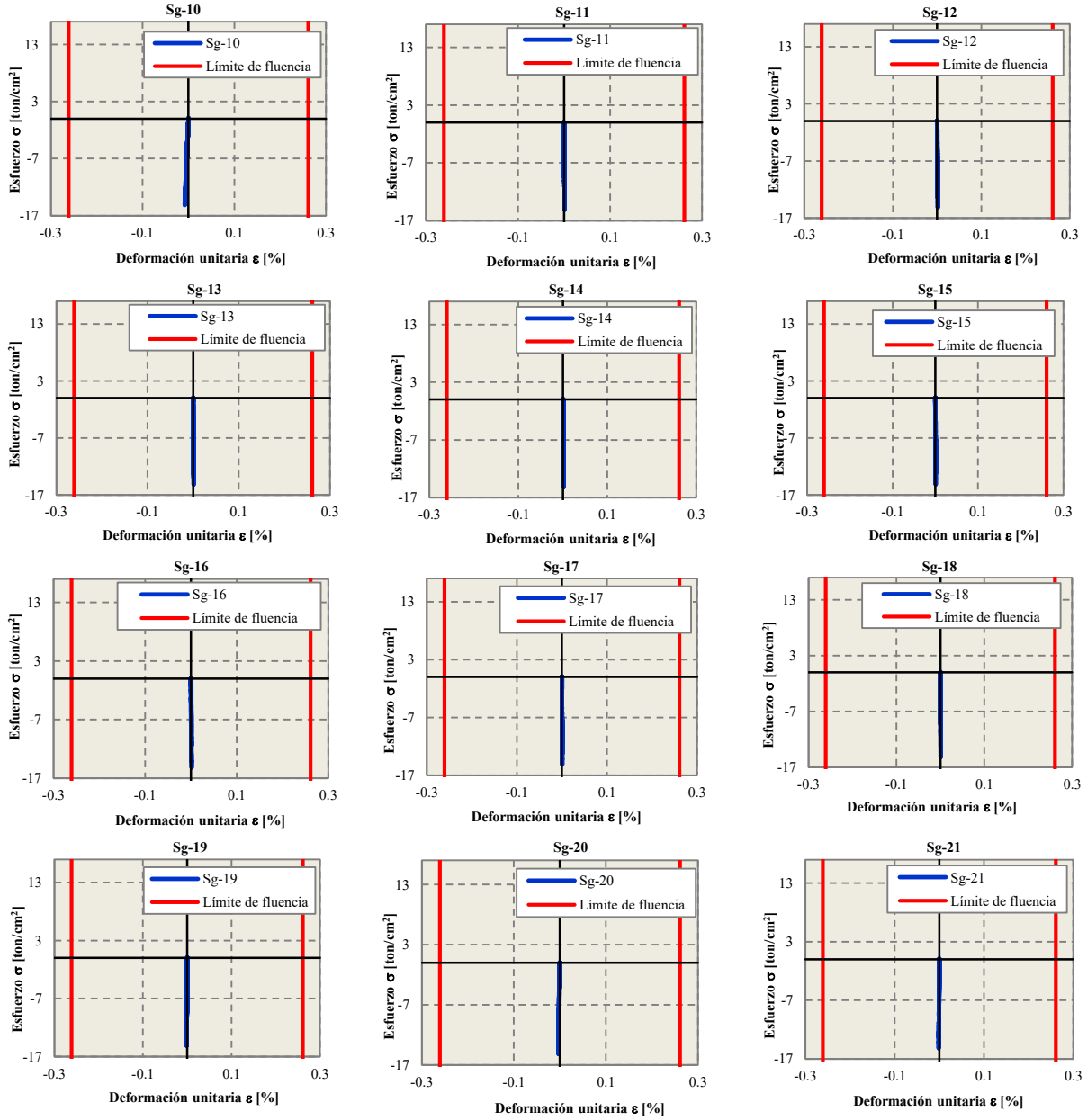


Figura G.2 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte A

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO



**Figura G.3 Deformaciones unitarias en acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-150-E1) Parte B**



G.1.2 Torón 2 DC-TP-150-E1

Tabla G.3 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte A

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	-0.0033	-0.0035	0.0006	0.0007	-0.0064	-0.0078	0.0009	0.0011	-0.0041	-0.0041
$\approx 0.50f_{pu}$	9568	-0.0040	-0.0041	0.0008	0.0011	-0.0079	-0.0095	0.0013	0.0014	-0.0049	-0.0048
$\approx 0.60f_{pu}$	11376	-0.0048	-0.0049	0.0009	0.0012	-0.0092	-0.0113	0.0016	0.0016	-0.0058	-0.0058
$\approx 0.70f_{pu}$	13276	-0.0057	-0.0059	0.0012	0.0012	-0.0108	-0.0133	0.0018	0.0018	-0.0071	-0.0070
$\approx 0.80f_{pu}$	15145	-0.0066	-0.0071	0.0012	0.0013	-0.0125	<b>-0.0153</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0021</b>	-0.0081	-0.0082

Tabla G.4 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte B

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	0.0006	0.0007	0.0004	0.0005	0.0005	0.0008	0.0006	0.0003	-0.0006	-0.0018	-0.0008
$\approx 0.50f_{pu}$	9568	0.0008	0.0009	0.0006	0.0008	0.0006	0.0008	0.0007	0.0005	-0.0007	-0.0022	-0.0008
$\approx 0.60f_{pu}$	11376	0.0010	0.0009	0.0006	0.0007	0.0008	0.0010	0.0008	0.0006	-0.0008	-0.0025	-0.0010
$\approx 0.70f_{pu}$	13276	0.0010	0.0012	0.0007	0.0007	0.0009	0.0010	0.0008	0.0006	-0.0010	-0.0028	-0.0013
$\approx 0.80f_{pu}$	15145	0.0012	0.0013	0.0008	0.0008	0.0010	0.0013	0.0008	0.0007	-0.0012	-0.0034	-0.0017

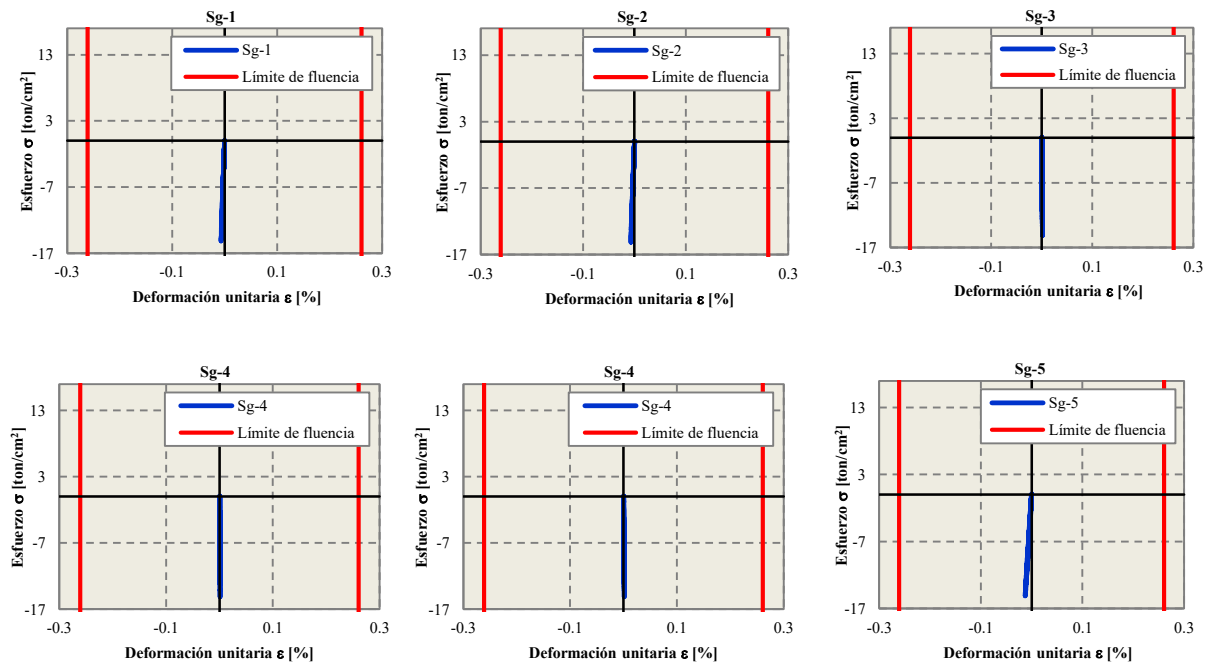
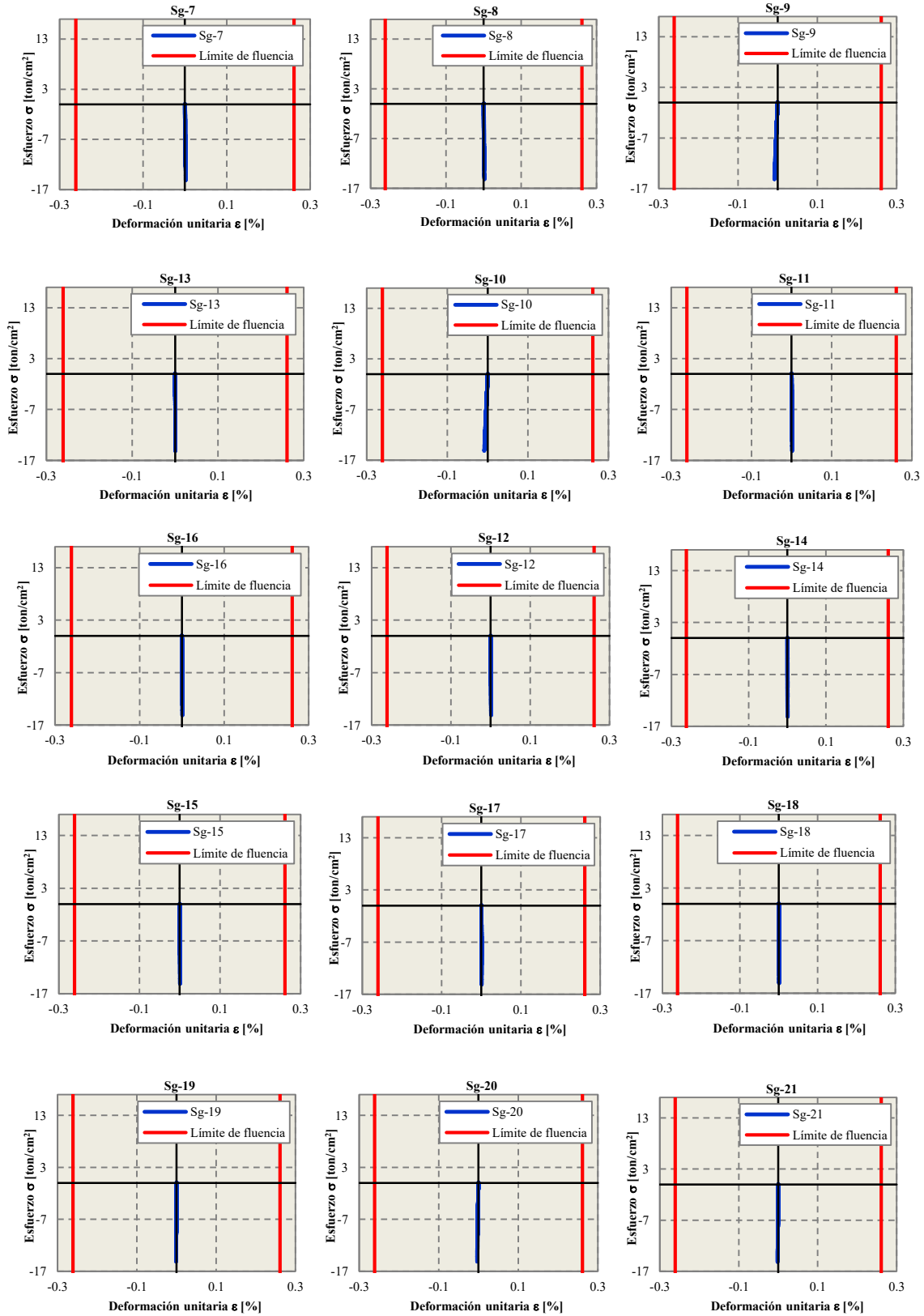


Figura G.4 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte A

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO



**Figura G.5 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-150-E1) Parte B**

### G.1.3 Torón 1 DS-TP-150-E2A

Tabla G.5 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-150-E2A) Parte A

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$											
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
Torón tenso	11385	-0.0054	-0.0058	0.0008	0.0008	-0.0098	<b>-0.0121</b>	0.0015	<b>0.0016</b>	-0.0063	-0.0063
1	9481	-0.0046	-0.0048	0.0008	0.0009	-0.0086	-0.0105	0.0013	0.0015	-0.0055	-0.0056
2	6967	-0.0035	-0.0036	0.0006	0.0008	-0.0063	-0.0077	0.0010	0.0011	-0.0042	-0.0042
3	4453	-0.0023	-0.0024	0.0005	0.0007	-0.0041	-0.0048	0.0008	0.0008	-0.0025	-0.0026
4	2861	-0.0015	-0.0015	0.0003	0.0005	-0.0025	-0.0031	0.0005	0.0006	-0.0016	-0.0016
5	-796	0.0002	0.0004	0.0000	0.0002	0.0005	0.0006	0.0001	0.0003	0.0002	0.0002

Tabla G.6 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-150-E2A) Parte B

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
Torón tenso	11385	0.0008	0.0010	0.0005	0.0005	0.0008	0.0009	0.0007	0.0005	-0.0010	-0.0030	-0.0018
1	9481	0.0007	0.0008	0.0003	0.0011	0.0006	0.0008	0.0007	0.0004	-0.0008	-0.0027	-0.0014
2	6967	0.0004	0.0007	0.0003	0.0010	0.0005	0.0006	0.0006	0.0004	-0.0007	-0.0022	-0.0011
3	4453	0.0003	0.0005	0.0001	0.0009	0.0003	0.0004	0.0005	0.0003	-0.0005	-0.0015	-0.0008
4	2861	0.0000	0.0005	0.0001	0.0008	0.0002	0.0003	0.0004	0.0003	-0.0003	-0.0011	-0.0007
5	-796	-0.0002	0.0002	-0.0001	0.0007	0.0000	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	-0.0003	-0.0002

### G.1.4 Torón 2 DS-TP-150-E2B

Tabla G.7 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte A

$\sigma_{OBJ} \approx 0.40f_{pu}$											
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
Torón tenso	8130	-0.0041	-0.0044	0.0006	0.0009	-0.0075	<b>-0.0091</b>	0.0012	0.0007	-0.0050	-0.0053
1	7499	-0.0040	-0.0044	0.0005	0.0007	-0.0075	-0.0089	0.0012	0.0006	-0.0047	-0.0050
2	6055	-0.0035	-0.0038	0.0002	<b>0.0087</b>	-0.0062	-0.0077	0.0010	0.0004	-0.0038	-0.0044
3	4373	-0.0035	-0.0038	0.0003	0.0084	-0.0063	-0.0080	0.0010	0.0004	-0.0037	-0.0042
4	2892	-0.0020	-0.0021	0.0002	0.0084	-0.0033	-0.0044	0.0006	0.0001	-0.0017	-0.0023
5	1884	-0.0016	-0.0016	0.0001	0.0085	-0.0026	-0.0032	0.0006	-0.0001	-0.0013	-0.0017
6	-130	-0.0006	-0.0007	-0.0001	0.0082	-0.0008	-0.0010	0.0003	-0.0004	-0.0002	-0.0007

**Tabla G.8 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-150-E2B) Parte B**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.40f_{du}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
Torón tenso	8130	0.0007	0.0006	0.0004	0.0000	0.0003	0.0006	0.0004	0.0002	-0.0011	-0.0019	-0.0009
1	7499	0.0007	0.0005	0.0002	-0.0002	0.0004	0.0004	0.0001	0.0003	-0.0009	-0.0018	-0.0009
2	6055	0.0007	0.0003	0.0003	0.0000	0.0003	0.0004	0.0004	0.0002	-0.0008	-0.0015	-0.0008
3	4373	0.0004	0.0003	0.0000	-0.0001	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	-0.0008	-0.0013	-0.0008
4	2892	0.0004	0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0002	0.0002	-0.0006	-0.0006	-0.0005
5	1884	0.0004	0.0001	0.0002	-0.0001	0.0001	0.0001	0.0003	0.0001	-0.0005	-0.0004	-0.0003
6	-130	0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001	0.0000	-0.0001	-0.0004	0.0000	-0.0001

## G.2 MODELO DE ENSAYE TP-250

### G.2.1 Torón 1 DC-TP-250-E1

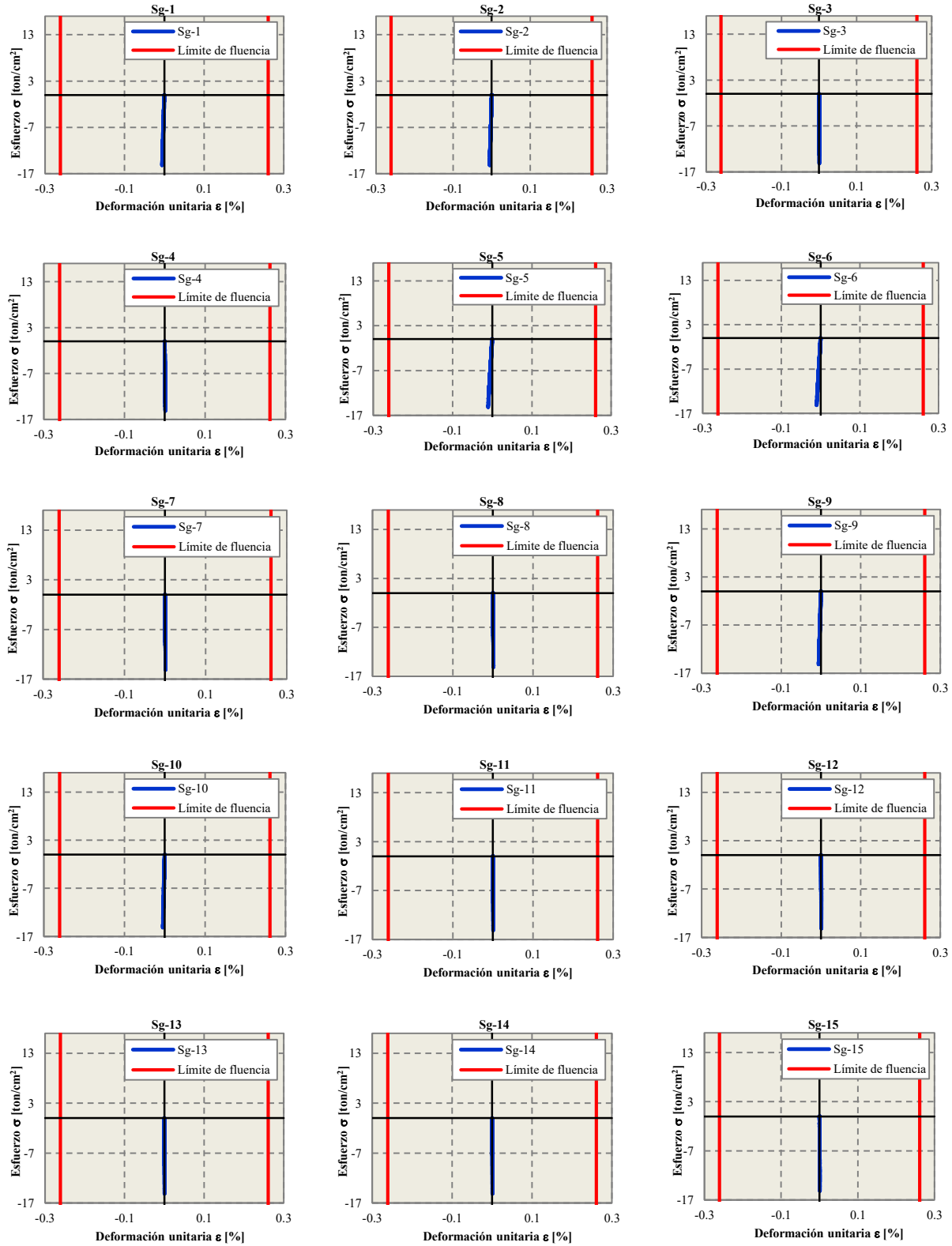
**Tabla G.9 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte A**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
		[%]									
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	-0.0028	-0.0026	0.0004	0.0005	-0.0055	-0.0052	0.0007	0.0008	-0.0029	-0.0025
$\approx 0.50f_{pu}$	9455	-0.0035	-0.0032	0.0005	0.0007	-0.0068	-0.0062	0.0009	0.0011	-0.0037	-0.0028
$\approx 0.60f_{pu}$	11367	-0.0042	-0.0039	0.0007	0.0009	-0.0083	-0.0075	0.0012	0.0012	-0.0042	-0.0034
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	-0.0049	-0.0045	0.0008	0.0009	-0.0095	-0.0088	0.0015	0.0014	-0.0050	-0.0041
$\approx 0.80f_{pu}$	15153	-0.0057	-0.0053	0.0009	0.0011	<b>-0.0104</b>	-0.0101	0.0015	<b>0.0016</b>	-0.0058	-0.0047

**Tabla G.10 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte B**

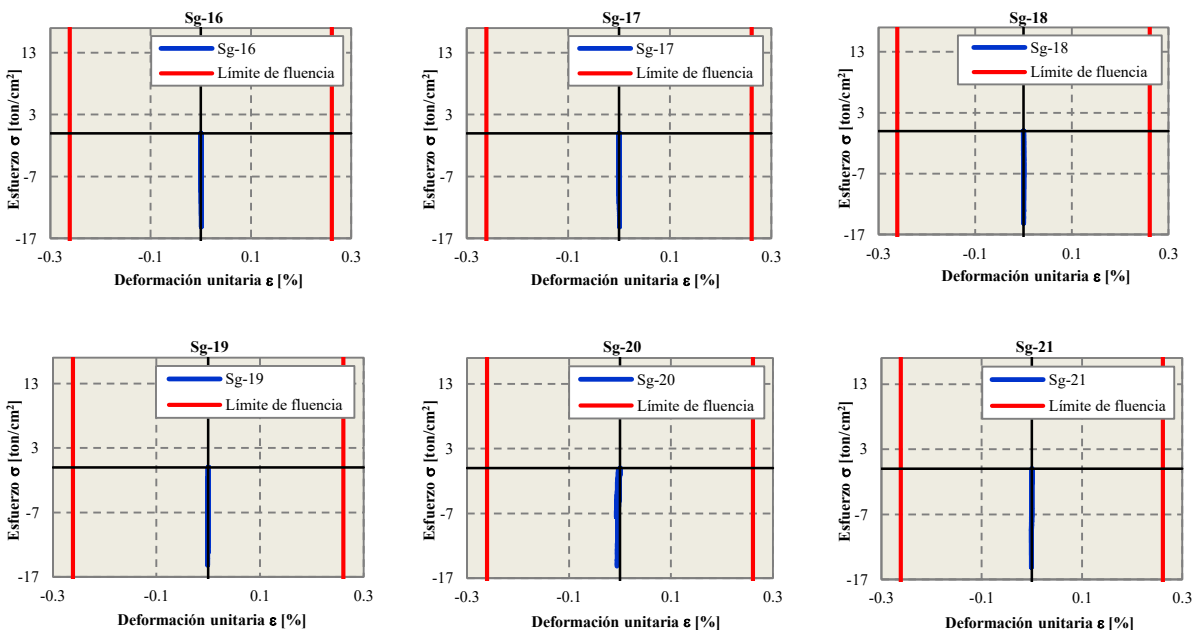
$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
$\approx 0.40f_{pu}$	7590	0.0001	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	-0.0004	-0.0073	-0.0008
$\approx 0.50f_{pu}$	9455	0.0004	0.0008	0.0006	0.0008	0.0007	0.0008	0.0005	0.0005	-0.0006	-0.0037	-0.0008
$\approx 0.60f_{pu}$	11367	0.0006	0.0008	0.0007	0.0008	0.0007	0.0009	0.0005	0.0005	-0.0006	-0.0046	-0.0010
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	0.0008	0.0011	0.0008	0.0010	0.0008	0.0012	0.0008	0.0007	-0.0006	-0.0051	-0.0011
$\approx 0.80f_{pu}$	15153	0.0009	0.0010	0.0008	0.0009	0.0009	0.0012	0.0007	0.0006	-0.0008	-0.0058	-0.0012

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO



**Figura G.6 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte A**

**APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL  
ACERO DE REFUERZO**



**Figura G.7 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-250-E1) Parte B**

**G.2.2 Torón 2 DC-TP-250-E1**

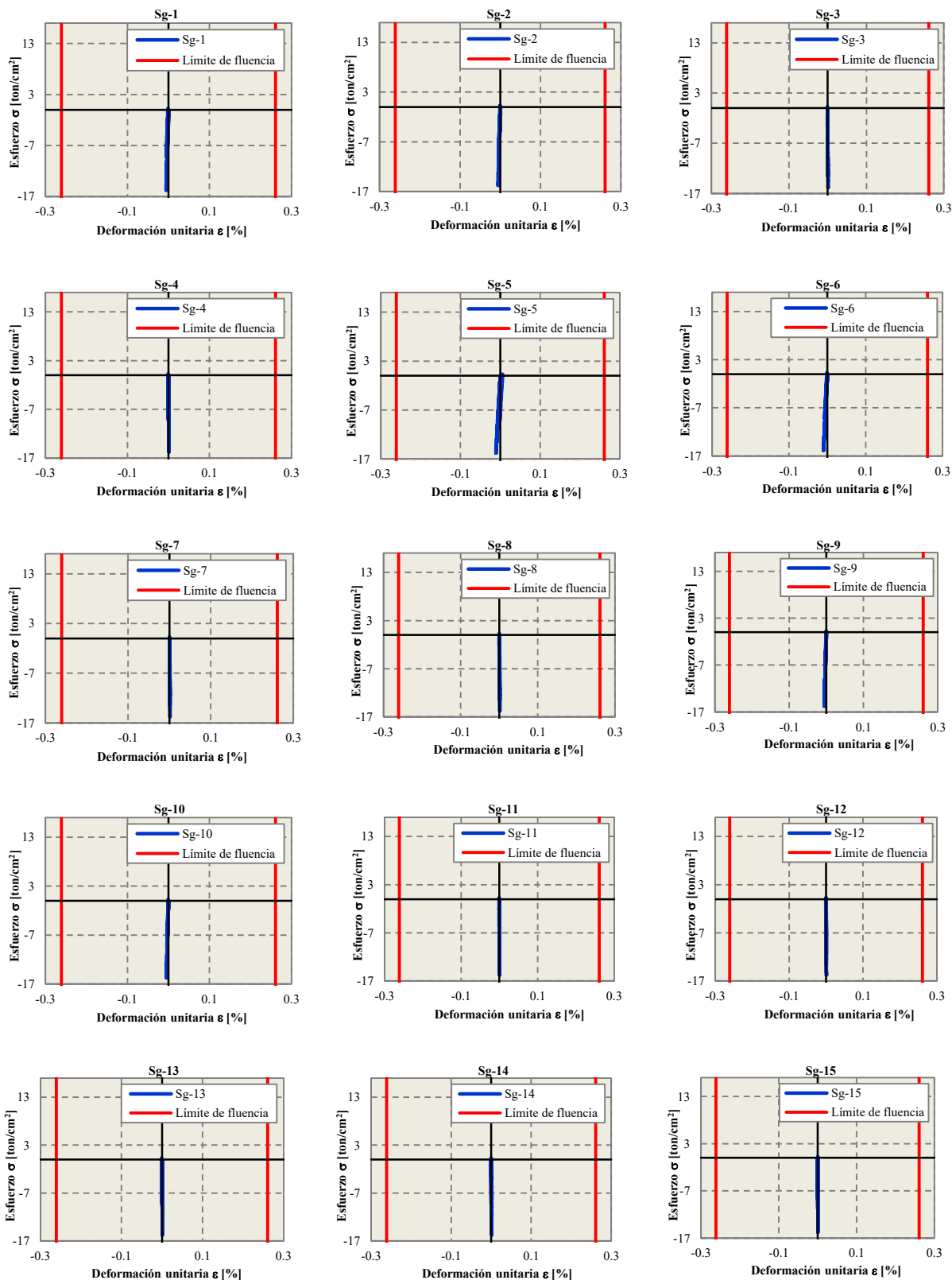
**Tabla G.11 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte A**

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	-0.0034	-0.0030	0.0003	0.0004	-0.0015	-0.0054	0.0009	0.0004	-0.0031	-0.0025
$\approx 0.50f_{pu}$	9516	-0.0050	-0.0036	0.0001	-0.0005	-0.0015	-0.0075	0.0010	0.0008	-0.0039	-0.0034
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	-0.0042	-0.0036	0.0009	0.0008	-0.0078	-0.0075	0.0014	<b>0.0017</b>	-0.0046	-0.0035
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	-0.0048	-0.0046	0.0010	0.0011	-0.0092	-0.0090	0.0015	0.0015	-0.0053	-0.0043
$\approx 0.80f_{pu}$	15163	-0.0057	-0.0052	0.0011	0.0012	<b>-0.0108</b>	-0.0100	0.0015	0.0016	-0.0059	-0.0048

**Tabla G.12 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte B**

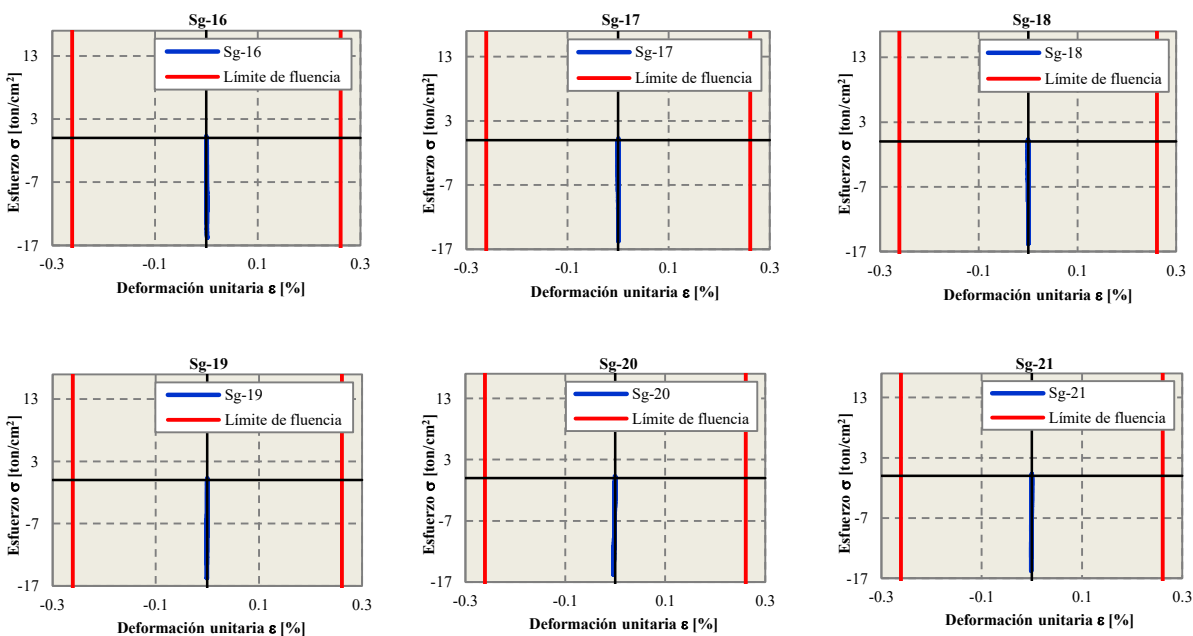
$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	0.0003	0.0001	0.0004	0.0004	0.0007	0.0004	0.0008	0.0002	-0.0006	-0.0015	-0.0008
$\approx 0.50f_{pu}$	9516	0.0001	-0.0003	0.0000	0.0000	0.0014	0.0004	0.0006	-0.0001	-0.0008	-0.0023	-0.0009
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	0.0007	0.0006	0.0008	0.0015	0.0008	0.0013	0.0003	0.0006	-0.0009	-0.0025	-0.0008
$\approx 0.70f_{pu}$	13293	0.0007	0.0009	0.0008	0.0011	0.0008	0.0011	0.0005	0.0005	-0.0008	-0.0030	-0.0012
$\approx 0.80f_{pu}$	15163	0.0008	0.0009	0.0009	0.0012	0.0008	0.0013	0.0006	0.0005	-0.0010	-0.0033	-0.0013

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO



**Figura G.8 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte A**

**APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL  
ACERO DE REFUERZO**



**Figura G.9 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-250-E1) Parte B**

**G.2.3 Torón 1 DS-TP-250-E2B**

**Tabla G.13 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.80f_{du}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] P <sub>REF</sub> /A	Sg-1	Sg-2	Sg-3	Sg-4	Sg-5 [%]	Sg-6	Sg-7	Sg-8	Sg-9	Sg-10	
Torón tenso	15169	-0.0056	-0.0056	0.0010	0.0010	-0.0103	<b>-0.0106</b>	<b>0.0015</b>	<b>0.0015</b>	-0.0063	-0.0050	
1	12352	-0.0045	-0.0044	0.0009	0.0009	-0.0080	-0.0089	0.0013	0.0013	-0.0052	-0.0042	
2	9184	-0.0033	-0.0033	0.0008	0.0008	-0.0058	-0.0068	0.0010	0.0010	-0.0039	-0.0031	
3	6657	-0.0024	-0.0024	0.0006	0.0006	-0.0039	-0.0050	0.0008	0.0008	-0.0028	-0.0023	
4	5123	-0.0023	-0.0020	0.0005	0.0006	-0.0027	-0.0039	0.0007	0.0007	-0.0023	-0.0018	
5	3214	-0.0009	-0.0009	0.0004	0.0004	-0.0016	-0.0025	0.0005	0.0004	-0.0014	-0.0010	
6	668	0.0002	0.0001	0.0003	0.0002	0.0002	-0.0005	0.0002	0.0001	-0.0003	-0.0001	
7	-657	0.0007	0.0007	0.0002	0.0002	0.0005	0.0001	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	



**Tabla G.14 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-250-E2B) Parte B**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.80f_{du}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	Sg-11	Sg-12	Sg-13	Sg-14	Sg-15	Sg-16	Sg-17	Sg-18	Sg-19	Sg-20	Sg-21
		[%]										
Torón tenso	15169	0.0008	0.0011	0.0009	0.0011	0.0008	0.0012	0.0007	0.0006	-0.0007	-0.0007	-0.0015
1	12352	0.0009	0.0010	0.0008	0.0010	0.0007	0.0010	0.0005	0.0006	-0.0005	-0.0003	-0.0011
2	9184	0.0007	0.0008	0.0007	0.0008	0.0004	0.0008	0.0005	0.0004	-0.0004	0.0001	-0.0009
3	6657	0.0005	0.0007	0.0006	0.0008	0.0003	0.0006	0.0003	0.0004	-0.0002	0.0004	-0.0007
4	5123	0.0004	0.0006	0.0005	0.0007	0.0002	0.0004	0.0003	0.0003	-0.0001	0.0005	-0.0006
5	3214	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0001	0.0003	-0.0001	0.0005	-0.0004
6	668	0.0001	0.0002	0.0002	0.0004	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	-0.0001	0.0006	-0.0001
7	-657	0.0000	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0007	-0.0077	-0.0002

#### G.2.4 Torón 2 DS-TP-250-E2B

**Tabla G.15 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{du}$											
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
		[%]									
Torón tenso	11386	-0.0042	-0.0040	0.0007	0.0008	<b>-0.0080</b>	-0.0078	<b>0.0010</b>	<b>0.0010</b>	-0.0046	-0.0038
1	9661	-0.0034	-0.0033	0.0007	0.0008	-0.0067	-0.0068	0.0008	<b>0.0010</b>	-0.0041	-0.0032
2	7425	-0.0025	-0.0025	0.0006	0.0007	-0.0050	-0.0053	0.0008	0.0008	-0.0031	-0.0025
3	3898	-0.0011	-0.0011	0.0003	0.0004	-0.0024	-0.0028	0.0004	0.0005	-0.0017	-0.0012
4	2692	-0.0007	-0.0008	0.0002	0.0004	-0.0016	-0.0019	0.0003	0.0003	-0.0012	-0.0008
5	330	0.0004	0.0003	0.0001	0.0003	-0.0003	-0.0002	0.0001	0.0000	-0.0002	-0.0001
6	-509	0.0007	0.0008	0.0004	0.0003	-0.0002	0.0003	0.0000	0.0001	0.0006	0.0006

**Tabla G.16 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-250-E2B) Parte B**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{du}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
Torón tenso	11386	0.0007	0.0009	0.0007	-0.0190	0.0006	0.0009	0.0005	0.0006	-0.0004	-0.0004	-0.0009
1	9661	0.0007	0.0009	0.0006	-0.0244	0.0005	0.0008	0.0005	0.0006	-0.0002	-0.0003	-0.0008
2	7425	0.0007	0.0008	0.0006	-0.0330	0.0004	0.0007	0.0005	0.0005	-0.0001	0.0000	-0.0007
3	3898	0.0004	0.0007	0.0003	-0.0409	0.0002	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0004	-0.0005
4	2692	0.0003	0.0005	0.0002	-0.0425	0.0001	0.0003	0.0002	0.0003	0.0001	0.0005	-0.0003
5	330	0.0002	0.0003	0.0001	-0.0432	0.0000	0.0000	0.0001	0.0002	0.0001	0.0004	-0.0001
6	-509	0.0001	0.0007	0.0004	-0.0509	0.0003	0.0002	0.0003	0.0003	0.0009	<b>-0.0080</b>	-0.0002

### G.3 MODELO DE ENSAYE TP-300

#### G.3.1 Torón 1 DC-TP-300-E1

Tabla G.17 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte A

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
		[%]									
$\approx 0.40f_{pu}$	7551	-0.0032	-0.0034	0.0005	0.0007	-0.0049	-0.0055	0.0010	0.0012	-0.0025	-0.0029
$\approx 0.50f_{pu}$	9507	-0.0041	-0.0042	0.0008	0.0009	-0.0059	-0.0067	0.0013	0.0014	-0.0031	-0.0038
$\approx 0.60f_{pu}$	11368	-0.0049	-0.0050	0.0008	0.0011	-0.0073	-0.0082	0.0015	0.0018	-0.0037	-0.0046
$\approx 0.70f_{pu}$	13250	-0.0058	-0.0060	0.0010	0.0012	-0.0086	-0.0096	0.0019	0.0020	-0.0044	-0.0055
$\approx 0.80f_{pu}$	15171	-0.0067	-0.0069	0.0012	0.0015	-0.0100	<b>-0.0111</b>	0.0023	0.0023	-0.0051	-0.0063

Tabla G.18 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte B

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
$\approx 0.40f_{pu}$	7551	0.0010	0.0014	0.0004	0.0005	0.0006	0.0008	0.0004	0.0006	-0.0005	-0.0011	-0.0008
$\approx 0.50f_{pu}$	9507	0.0014	0.0016	0.0006	0.0007	0.0008	0.0009	0.0005	0.0008	-0.0007	-0.0013	-0.0011
$\approx 0.60f_{pu}$	11368	0.0016	0.0020	0.0007	0.0008	0.0008	0.0011	0.0006	0.0010	-0.0008	-0.0016	-0.0012
$\approx 0.70f_{pu}$	13250	0.0018	0.0023	0.0009	0.0008	0.0009	0.0013	0.0007	0.0010	-0.0007	-0.0019	-0.0015
$\approx 0.80f_{pu}$	15171	0.0019	<b>0.0025</b>	0.0009	0.0009	0.0009	0.0014	0.0007	0.0011	-0.0010	-0.0022	-0.0019

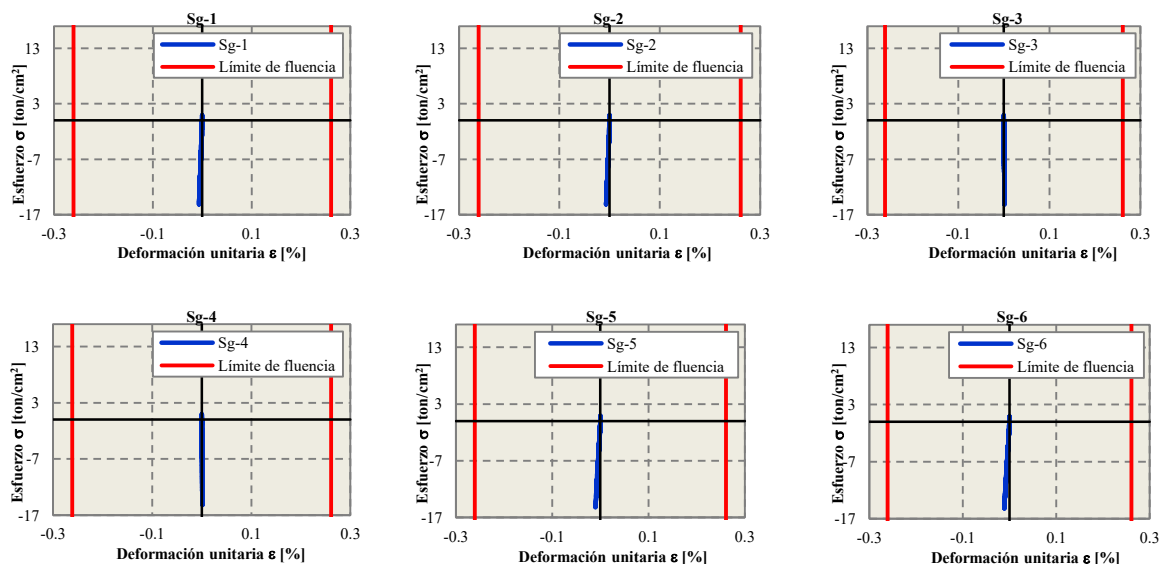
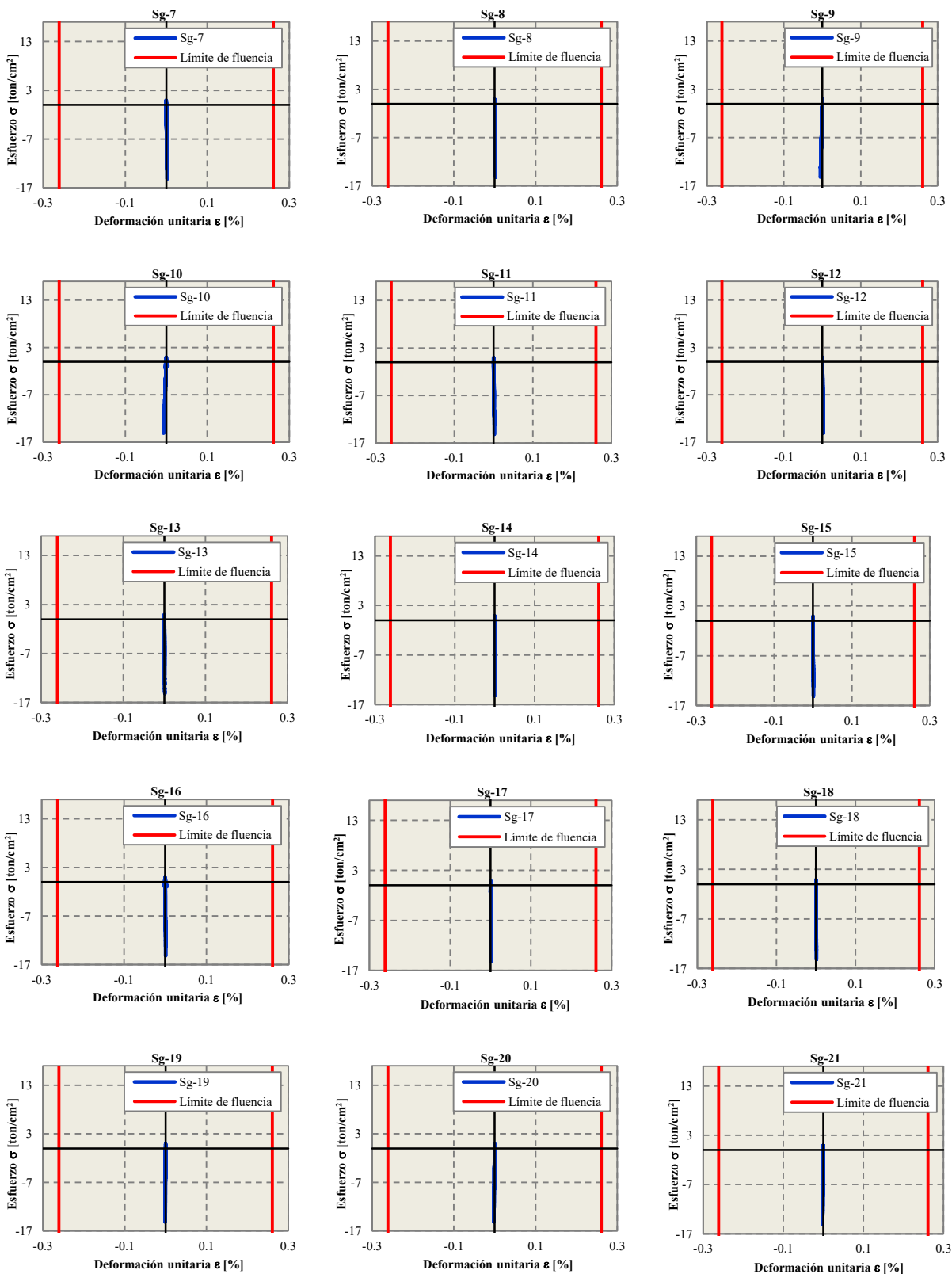


Figura G.10 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte A

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO



**Figura G.11 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DC-TP-300-E1) Parte B**

### G.3.2 Torón 2 DC-TP-300-E1

Tabla G.19 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte A

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
		[%]									
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	-0.0034	-0.0036	0.0006	0.0007	-0.0049	-0.0056	0.0011	0.0013	-0.0024	-0.0029
$\approx 0.50f_{pu}$	9494	-0.0043	-0.0045	0.0006	0.0008	-0.0062	-0.0072	0.0014	0.0015	-0.0030	-0.0038
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	-0.0049	-0.0052	0.0008	0.0009	-0.0074	-0.0083	0.0018	0.0018	-0.0039	-0.0046
$\approx 0.70f_{pu}$	13280	-0.0058	-0.0060	0.0010	0.0012	-0.0086	-0.0096	0.0019	0.0022	-0.0044	-0.0054
$\approx 0.80f_{pu}$	15162	-0.0066	-0.0069	0.0012	0.0015	-0.0097	<b>-0.0110</b>	0.0022	0.0024	-0.0054	-0.0063

Tabla G.20 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte B

$\sigma_{OBJ}$	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
		[%]										
$\approx 0.40f_{pu}$	7594	0.0010	0.0014	0.0004	0.0003	0.0005	0.0008	0.0003	0.0008	-0.0007	-0.0011	-0.0010
$\approx 0.50f_{pu}$	9494	0.0011	0.0016	0.0005	0.0005	0.0006	0.0008	0.0004	0.0008	-0.0008	-0.0015	-0.0012
$\approx 0.60f_{pu}$	11372	0.0016	0.0021	0.0006	0.0007	0.0008	0.0010	0.0006	0.0009	-0.0008	-0.0017	-0.0013
$\approx 0.70f_{pu}$	13280	0.0017	0.0023	0.0008	0.0007	0.0008	0.0013	0.0007	0.0010	-0.0008	-0.0020	-0.0016
$\approx 0.80f_{pu}$	15162	0.0021	<b>0.0025</b>	0.0008	0.0009	0.0011	0.0015	0.0007	0.0012	-0.0009	-0.0021	-0.0018

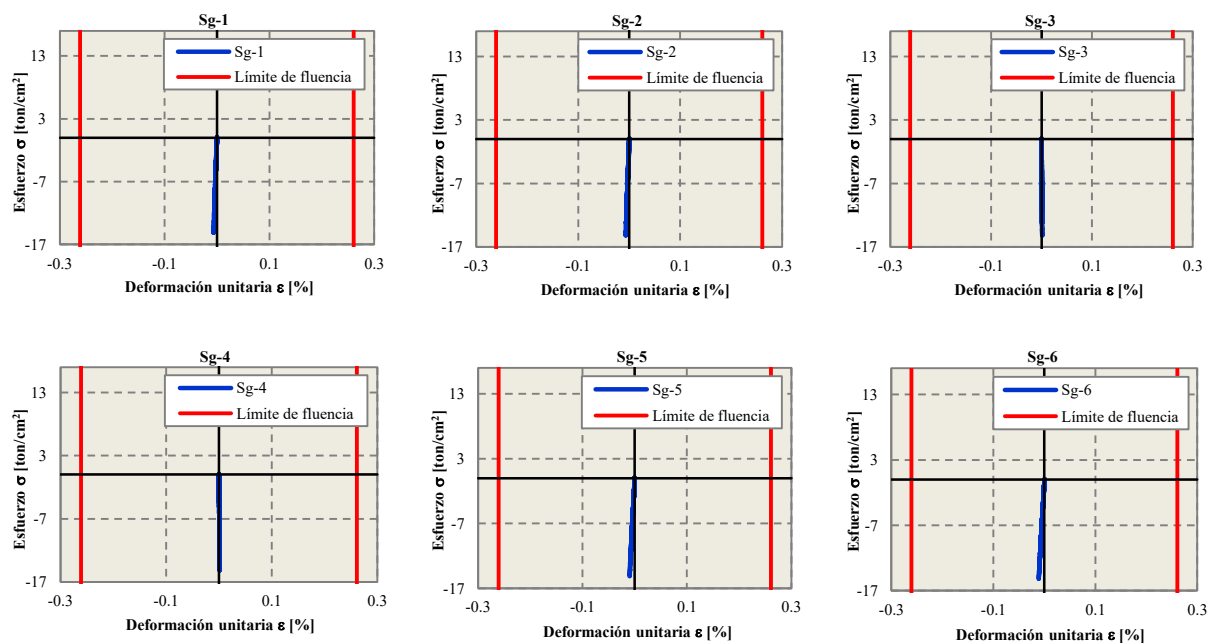


Figura G.12 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte A

## APÉNDICE G: DEFORMACIONES UNITARIAS EN EL ACERO DE REFUERZO

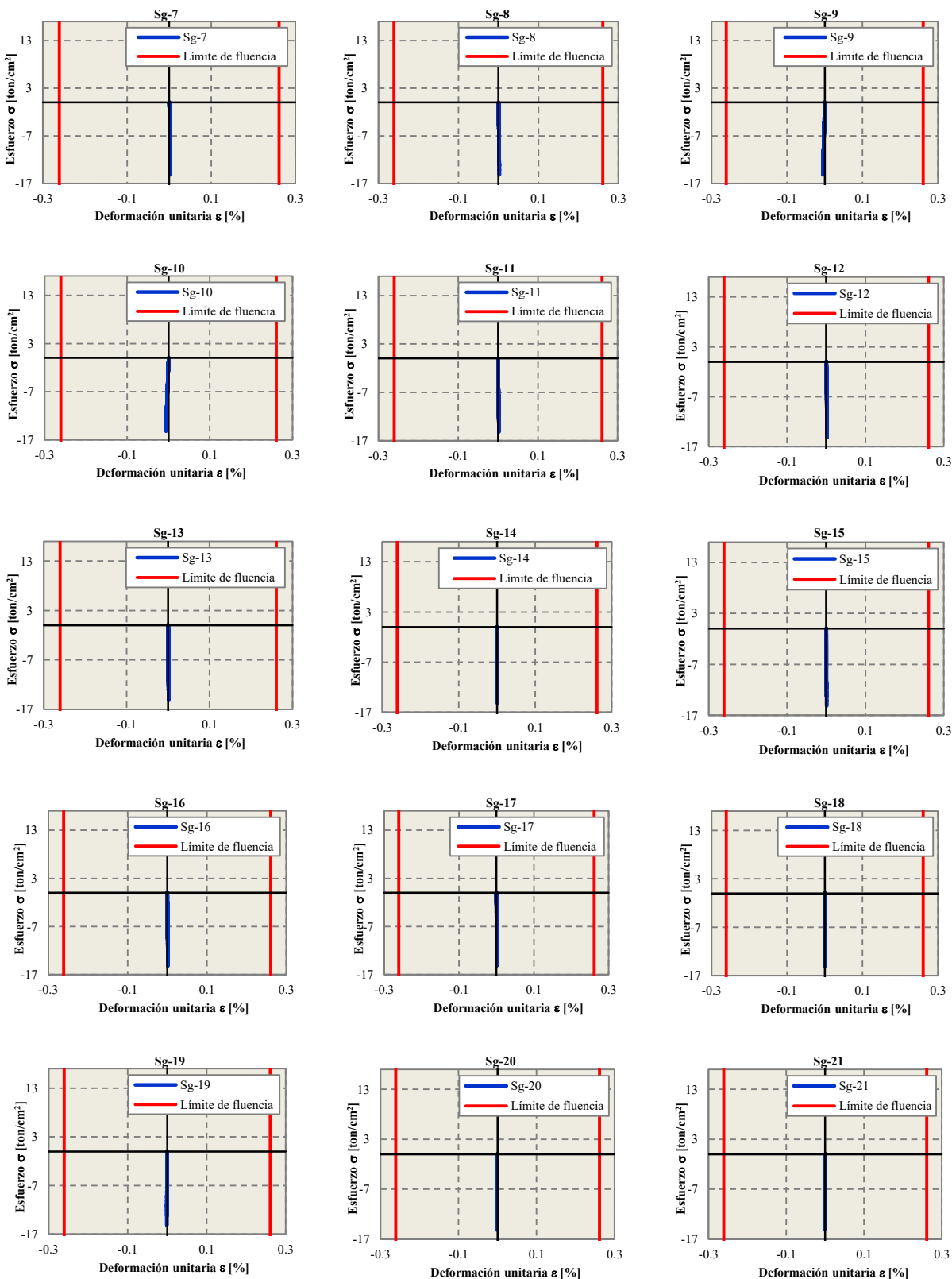


Figura G.13 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DC-TP-300-E1) Parte B

### G.3.3 Torón 1 DS-TP-300-E2A

**Tabla G.21 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-300-E2A) Parte A**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$											
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
Torón tenso	11475	-0.0067	-0.0073	0.0021	0.0023	-0.0092	<b>-0.0104</b>	0.0026	<b>0.0028</b>	-0.0042	-0.0050
1	9537	-0.0057	-0.0061	0.0019	0.0020	-0.0077	-0.0088	0.0023	0.0025	-0.0033	-0.0041
2	6993	-0.0043	-0.0047	0.0015	0.0016	-0.0058	-0.0065	0.0016	0.0020	-0.0023	-0.0029
3	4410	-0.0027	-0.0029	0.0010	0.0012	-0.0038	-0.0042	0.0011	0.0010	-0.0012	-0.0017
4	3146	-0.0019	-0.0021	0.0008	0.0008	-0.0026	-0.0028	0.0008	0.0008	-0.0008	-0.0011
5	1597	-0.0010	-0.0009	0.0006	0.0006	-0.0014	-0.0013	0.0005	0.0005	-0.0004	-0.0004
6	606	-0.0004	-0.0004	0.0003	0.0004	-0.0006	-0.0004	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
7	-731	0.0004	0.0005	0.0000	0.0001	0.0005	0.0008	-0.0001	-0.0003	0.0005	0.0006

**Tabla G.22 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 1 DS-TP-300-E2A) Parte B**

$\sigma_{OBJ} \approx 0.60f_{pu}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
							[%]					
Torón tenso	11475	0.0016	0.0018	0.0007	0.0006	0.0008	0.0011	0.0005	0.0009	-0.0008	-0.0014	-0.0010
1	9537	0.0014	0.0018	0.0006	0.0004	0.0007	0.0009	0.0005	0.0008	-0.0005	-0.0012	-0.0008
2	6993	0.0011	0.0013	0.0004	0.0005	0.0006	0.0007	0.0004	0.0007	-0.0003	-0.0011	-0.0005
3	4410	0.0007	0.0010	0.0003	0.0003	0.0003	0.0006	0.0002	0.0005	-0.0001	-0.0006	-0.0004
4	3146	0.0006	0.0008	0.0003	0.0003	0.0003	0.0005	0.0001	0.0004	0.0000	-0.0004	-0.0002
5	1597	0.0004	0.0006	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.0001	0.0004	0.0001	-0.0002	0.0000
6	606	0.0002	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002	0.0000	0.0002	0.0002	-0.0001	0.0001
7	-731	0.0000	0.0002	0.0002	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0001	0.0003	0.0001	0.0001

### G.3.4 Torón 2 DS-TP-300-E2A

Tabla G.23 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-300-E2A) Parte A

$\sigma_{OBJ} \approx 0.70f_{pu}$											
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5 [%]	SG6	SG7	SG8	SG9	SG10
Torón tenso	13290	-0.0070	-0.0073	0.0007	0.0008	-0.0103	-0.0118	0.0017	0.0022	-0.0008	-0.0060
1	13060	-0.0071	-0.0074	0.0008	0.0009	-0.0106	<b>-0.0119</b>	0.0022	0.0026	0.0008	-0.0059
2	10637	-0.0060	-0.0061	0.0008	0.0008	-0.0090	-0.0102	0.0018	0.0025	0.0015	-0.0049
3	7716	-0.0047	-0.0048	0.0005	0.0006	-0.0070	-0.0080	0.0014	0.0021	0.0025	-0.0037
4	4813	-0.0033	-0.0034	0.0003	0.0004	-0.0050	-0.0056	0.0011	0.0016	0.0034	-0.0024
5	3182	-0.0025	-0.0025	0.0001	0.0002	-0.0039	-0.0042	0.0008	0.0013	0.0039	-0.0016
6	1312	-0.0016	-0.0015	-0.0001	0.0000	-0.0024	-0.0025	0.0005	0.0009	0.0044	-0.0006
7	-1432	-0.0005	-0.0003	-0.0002	-0.0002	-0.0008	-0.0006	0.0001	0.0005	<b>0.0052</b>	0.0016

Tabla G.24 Deformaciones unitarias en el acero de refuerzo (Torón 2 DS-TP-300-E2A) Parte B

$\sigma_{OBJ} \approx 0.70f_{pu}$												
Sec. de corte	$\sigma_{REF}$ [kg/cm <sup>2</sup> ] $P_{REF}/A$	SG11	SG12	SG13	SG14	SG15	SG16 [%]	SG17	SG18	SG19	SG20	SG21
Torón tenso	13290	0.0009	0.0014	0.0003	0.0004	0.0004	0.0007	0.0003	0.0006	-0.0014	-0.0023	-0.0018
1	13060	0.0009	0.0018	0.0003	0.0005	0.0003	0.0006	0.0004	0.0012	-0.0011	-0.0020	-0.0020
2	10637	0.0007	0.0015	0.0001	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0010	-0.0010	-0.0017	-0.0017
3	7716	0.0004	0.0011	0.0000	0.0003	0.0001	0.0002	0.0001	0.0009	-0.0008	-0.0012	-0.0014
4	4813	0.0000	0.0007	-0.0001	0.0001	-0.0002	-0.0001	0.0000	0.0007	-0.0005	-0.0008	-0.0010
5	3182	-0.0002	0.0004	-0.0002	0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0001	0.0006	-0.0005	-0.0005	-0.0008
6	1312	-0.0005	0.0001	-0.0003	0.0000	-0.0004	-0.0004	-0.0001	0.0004	-0.0003	-0.0002	-0.0006
7	-1432	-0.0008	-0.0002	-0.0005	-0.0002	-0.0003	0.0005	-0.0003	0.0002	-0.0001	0.0003	-0.0002